

**Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation
et l'Agriculture – FAO**

Bureau Régional pour le Proche-Orient

**Manuel d'utilisation des boues résiduelles issues
des stations d'épuration des eaux usées :**

**Etat de l'art et tentatives d'adaptation
aux pays de Proche Orient**

**Préparé par :
Brahim SOUDI**

Mars 2003

Table des matières

Avant – Propos

1. Introduction	1
2. Définition, typologie et caractérisation des boues	2
2.1. Définition	2
2.2. Typologie de boues résiduaires	2
2.3. Quantités de boues produites.....	3
2.4. Caractéristiques des boues	4
2.4.1. Caractéristiques physiques et composition en éléments nutritifs	4
2.4.2. Composition des boues en éléments traces	5
2.4.3. Composées organiques toxiques	8
2.4.4. Pathogènes	8
2.5. Constat général sur la composition des boues	12
3. Impacts négatifs des boues résiduaires non traitées	13
3.1. Impact des éléments traces.....	13
3.2. Impact des germes pathogènes	15
4. Filières de traitement des boues et mesures d'atténuation des impacts négatifs.....	16
4.1. Introduction	16
4.2. Point sur les filières de traitement et d'évacuation des boues	17
4.3. Répartition des filières adoptées dans les pays industrialisés.....	21
4.4. Récapitulatif sur les filières de traitement des boues	22
4.5. Filières adaptées aux régions de proche orient.....	22
4.5.1. Le séchage des boues	24
4.5.2. Compostage des boues	26
4.5.3. Gestion de la contrainte liée aux métaux lourds.....	33
4.5.4. Gestion de la contrainte liée aux pathogènes	33
5. Aspects agronomiques de valorisation des boues.....	34
5.1. Valeur fertilisante des boues	34
5.2. Valeur fertilisante du compost	36
5.3. Doses d'application.....	37
5.4. Mode d'application des boues.....	39
5.5. Coût d'application.....	40
5.6. Stockage des boues	40
5.7. Coût de stockage et de transport.....	41
5.8. Principaux types d'usage des boues résiduaires	42
5.9. Quelques études de cas dans la région du proche orient	43
5.10. Récapitulatif sur les effets des boues sur la qualité des sols.....	44
6. Essais d'évaluation de la valeur agronomique des boues ou compost de boues.....	45
6.1. Objectifs des expérimentations	45
6.2. Traitements envisageables.....	45
7. Directives de contrôle et de surveillance	48
7.1. Boues.....	48
7.2. Végétaux	49
7.3. Sols.....	49
7.4. Eaux	49
7.5. Récapitulatif de quelques bonnes pratiques	49
8. Production de biogaz et de chaleur : une autre voie de valorisation.....	51
9. Conclusions et recommandations	52
Références bibliographiques	54

Avant-propos

Les eaux usées domestiques issues des agglomérations humaines sont généralement collectées et traitées dans le souci de protéger la santé des populations et l'environnement. Les produits de traitement comprennent les eaux usées traitées, dont la qualité dépend du niveau de traitement adopté, et les déchets semi solides appelées communément boues résiduaires. Dans les régions où les ressources en eau fraîche n'arrivent pas à couvrir la demande pour les différents usages, l'utilisation des eaux usées traitées à des fins multiples permet de combler une partie du déficit hydrique et constitue un autre objectif du traitement.

L'accumulation des boues résiduaires pose à son tour des problèmes majeurs. Elles constituent ainsi en cas d'un traitement inadéquat ou d'élimination sporadique une nuisance pour l'environnement. .

Le présent manuel a un triple objectif : 1) une mise au point sur les développements récents en matière de technologies de traitement et de valorisation des boues résiduaires ; 2) l'évaluation des avantages agronomiques et économiques qui en résultent ; et 3) une présentation des impacts négatifs inhérents et des mesures de leur atténuation.

Ces trois aspects sont traités, en mettant l'accent sur l'expérience internationale et les possibilités d'adaptation des résultats aux zones dont les conditions climatiques, économiques et sociales sont similaires à celles de la région du Proche Orient (Sud-ouest de l'Asie, Moyen-orient et Afrique du Nord). Des propositions concernant l'usage rationnel des boues sont émises en tenant compte des spécificités agro-pédologiques et environnementales de ces régions.

Des éléments pratiques relatés dans des encadrés joueront le rôle de coffres à outils qui offrent à l'utilisateur de ce manuel des enseignements précieux en matière de gestion des boues.

Ce manuel tente aussi d'adapter les technologies de traitement et des normes d'utilisation au contexte de la région du Proche Orient.

1. Introduction

L'épuration des eaux usées répond à un souci de protection du milieu récepteur et offre des possibilités de valorisation des eaux épurées. Elle s'accompagne malheureusement d'une production de quantités importantes de boues résiduelles. Les questions relatives à leur évacuation, leur traitement et leur valorisation se posent avec acuité et demeurent actuellement à l'ordre du jour.

L'application des boues au sol revêt plusieurs avantages bénéfiques, essentiellement l'apport en éléments nutritifs et l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol. Les éléments nutritifs, progressivement fournis aux plantes sont les éléments majeurs, azote, phosphore et potassium ; les éléments secondaires, calcium, magnésium ; et les micro-éléments ou éléments mineurs. Les propriétés physiques et physico-chimiques du sol sont améliorées par l'augmentation de la teneur en matière organique, qui elle-même contribue à une meilleure rétention en eau, une stabilisation de la structure, une plus grande capacité d'échange cationique, etc.

Toutefois, les boues peuvent contenir des substances indésirables à effets néfastes sur la qualité des sols et des eaux et sur la qualité des produits agricoles. Ainsi, pour capitaliser les avantages des boues, un certain nombre de bonnes pratiques de traitement et d'épandage s'avèrent nécessaires pour assurer un usage économiquement rentable et sans risques sanitaires et environnementaux. Les trois risques, communément connus, qui méritent d'être atténués sont (i) le risque de pollution des eaux : pollution nitrique des eaux souterraines et eutrophisation des eaux de surface par un excès d'azote et de phosphore, (ii) la phytotoxicité par les métaux lourds et leur transfert à l'Homme et/ou l'animal à travers les chaînes alimentaires et (iii) le risque sanitaire lié aux germes pathogènes.

Trois questions fondamentales devront être posées pour une meilleure appréhension des modalités de gestion des boues :

- Quels sont les types de traitements de boues adaptés, simples et les moins coûteux à préconiser dans la région ?
- Quel est mode d'évacuation écologiquement durable et économiquement justifié ?
- Comment valoriser les boues avec un minimum de risque pour la santé et l'environnement ?

2. Définition, typologie et caractérisation des boues

2.1. Définition

Une boue résiduaire ou boue de station d'épuration (*Sewage Sludge* en anglais) est la matière résiduelle du traitement des eaux usées. Les boues résiduaires ont récemment été appelées "biosolides" afin d'atténuer l'impact psychologique négatif lié à l'appellation "boue". La boue résiduaire est aussi définie comme étant un sous produit solide, semi-solide ou liquide de l'épuration des eaux usées.

2.2. Typologie de boues résiduaires

L'examen de la littérature internationale révèle différents modes de typologie des boues. Cette typologie se fait, soit sur base de la consistance physique, soit de la modalité de traitement, soit encore sur base de la transformation des boues et leur niveau de stabilisation, selon le procédé ou le degré d'épuration des eaux usées. Les différents types de boues catégorisés sur la base de ces critères sont rapportés dans l'encadré 1.

Encadré 1. Types de boues résiduaires

Sur base de consistance physique et/ou du pré traitement des boues

- Boue liquide (2 à 8 % de matière sèche)
- Boue pâteuse (10 à 25 % de matière sèche)
- Boue séchée (90 à 95 % de matière sèche)
- Boue chaulée (20 à 40 % de matière sèche)
- Boue compostée (50 à 70 % de matière sèche)

Sur base du procédé d'épuration et/ou du degré d'épuration

- **Boues primaires** : dépôts obtenus par simple décantation, riches en matières minérales et en matières organiques biodégradables. Elles sont générées par les systèmes de décantation - digestion adoptés dans les petites collectivités.
- **Boues physico-chimiques** : boues formées après ajout de sels coagulants (sels d'Aluminium et/ou de fer, etc.). Elles sont particulièrement riches en sels métalliques.
- **Boues secondaires** : boues résultant des filières de traitement biologique. Elles sont constituées en grande partie par des composés bactériens et de matières organiques.
- **Boues mixtes** : il s'agit d'un mélange de boues primaires et secondaires. Elles sont donc générées par des procédés d'épuration complets.
- **Boues d'aération prolongée** : boues mixtes résultant des systèmes d'épuration basée sur l'aération naturelle (lagunage naturelle légèrement aéré) ou forcée (lagunage aérée) n'incluant pas l'étape de décantation primaire. Ces boues sont généralement assez biodégradées.

Le tableau 1 relate les différents types de boues produites en fonction des filières d'épuration des eaux usées.

Tableau 1. Différents types de boues en fonction du procédé d'épuration (Données recueillies de OTV, 1997)

Filière d'épuration	Type de boue
Système intensif à boues activées	Boues liquides épaissées à 7 - 8 % de matière sèche
Système intensif à boues activées	Boues déshydratées chaulées ou non à 20 - 30 % de matière sèche
Système intensif à boues activées	Boues séchées par voie thermique à 80 - 90 % de matière sèche
Système intensif à boues activées	Boues compostées à 50-60 % de matière sèche
Lagunage avec lits de séchage naturel des boues	Boues séchées à 89 % de matière sèche
Infiltration - percolation	Boues de curage des bassins d'infiltration à 18 % de matière sèche

2.3. Quantités de boues produites

Les quantités de boues produites varient, en général, en fonction de la composition des eaux usées brutes et du niveau de la charge organique alimentant les bactéries (Duchène, 1990). Quelques ordres de grandeurs de quantités de boues produites sont rapportés dans l'encadré 2.

Encadré 2. Ordres de grandeurs de quantités de boues produites

- 30 à 40 g de MES/ EH.j (Bruce et al., 1992 ; Duchène, 1990): cas des systèmes d'épuration biologiques lorsque le système d'épuration est séparatif (seules les eaux usées domestiques sont raccordées à la station d'épuration),
- 100 à 150 l/habitant raccordé.an (Duchène, 1990): cas du lagunage naturel,
- 400 l/habitant raccordé.an (Duchène, 1990) : cas du systèmes à boues activées.

Selon différentes sources, ces estimations demeurent théoriques et doivent être corrigées localement compte tenu :

- de la composition des eaux usées : apport d'eaux usées industrielles et de matières de vidange ;
- de l'efficacité du réseau d'assainissement : degré de raccordement des habitants, fuites liées aux trop-plein ou aux cassures, introduction d'eaux claires parasites ;
- du fonctionnement de la station d'épuration : efficacité (pas de pertes de boues), charge massique du traitement biologique, ajout de réactifs (déphosphatation).

2.4. Caractéristiques des boues

2.4.1. Caractéristiques physiques et composition en éléments nutritifs

Etant donnée la multitude des procédés d'épuration des eaux usées et des filières de traitement des boues, celles-ci présentent généralement une composition très variable. Le tableau 2 relate une fourchette de composition générale de cinq principaux types de boues. D'autres exemples de composition des boues, puisés des travaux menés en Algérie, au Maroc et en Tunisie sont rapportés dans les tableaux 3, 4 et 5.

Tableau 2. Composition des principaux types de boues (ADEME, 2001)

Paramètre	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Boue compostée
Matière sèche (% de matière brute)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Matière organique (% de MS)	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Matière minérale (% de MS)	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6.5 à 7.0	7 à 8		9 à 12	6 à 7
C/N	4 à 5		4 à 6	8 à 11	15 à 25
N* (kg/tonne de matière brute)	2 à 4	8 à 12	3 à 5	6 à 9	5 à 9
P ₂ O ₅ kg/tonne de matière brute)	2 à 3	6 à 9	5 à 7	6 à 10	6 à 8
K ₂ O kg/tonne de matière brute)	0.9	0.8	5	1	1 à 2
CaO (kg /tonne de matière brute)	1 à 3	5 à 15	40 à 60	60 à 90	10 à 30
MgO kg/tonne de matière brute)	0.5	1 à 2	5	1 à 2	1 à 2

*N : 80 à 90 % sous forme organique et 10 à 20 % sous forme d'azote ammoniacal si la boue est liquide

Tableau 3. Exemple de composition des boues séchées et chaulées en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000)

Paramètre	Valeur
pH	6.9
CE (dS/m à 25 °C)	4.01
Matière sèche (%)	88.7
Matière organique (%)	56.4
N total (%)	2.87
P (mg/kg)	355
K (mg/kg)	964

Tableau 4. Exemple de composition de boues en Tunisie (Gabteni et Gallali, 1988).

Paramètre	Valeur
pH	6.9
Carbone organique (%)	26.2
N total (%)	2.25
C/N	11.6

Tableau 5. Exemple de composition de boues issues d'une station d'épuration des eaux usées par lagunage au Sud du Maroc (Soudi et Jemali, 1998)

Paramètre	Unité	Valeur
pH	-	6.7
Matière organique	(% de MS)	38.6
Azote total	(% de MS)	1.47
P ₂ O ₅	(% de MS)	0.76
K ₂ O	(% de MS)	0.28
MgO	(% de MS)	1.26
CaO	(% de MS)	6.71
Eléments traces		
Zn	(mg/kg de MS)	156
Cu	(mg/kg de MS)	93.8
Ni	(mg/kg de MS)	33.4
Co	(mg/kg de MS)	17.4
Mn	(mg/kg de MS)	224.9
Pb	(mg/kg de MS)	172.1
Cd	(mg/kg de MS)	2.6

2.4.2. Composition des boues en éléments traces

Il convient dans un premier temps d'apporter une précision de terminologie : on parle très souvent de métaux lourds ou éléments traces métalliques or l'appellation la plus judicieuse est « éléments traces ». Effectivement, ces éléments sont, le plus souvent métalliques mais certains éléments comme l'arsenic, le sélénium et le bore doivent être pris en compte (Chaussod, 2000). D'après le même auteur, la plupart de ces éléments sont aussi des oligo-éléments nécessaires à la vie en faible concentration dont les plus connus sont le zinc et le cuivre. Par contre le plomb, le cadmium, et le mercure n'ont aucun rôle vital et sont toxiques au delà d'une certaine concentration.

La fourchette de composition des boues en éléments traces est rapportée dans le tableau 6. D'autres exemples de composition en ces éléments sont rapportés dans les tableaux 7 et 8.

Tableau 6. Composition typique d'éléments traces dans les boues résiduaires (données issues de différentes sources rapportées par Elliott (1984).

Métal ou Élément trace	Fourchette de concentrations (mg/Kg de boue sèche)	Valeur médiane (mg/kg)
Ag	Nd – 960	90
As	230	10
B	4 – 1 000	33
Ba	Nd – 300	1300
Cd	1 – 3 410	15
Co	1 – 260	10
Cr	10 – 99 000	500
Cu	84 – 17 000	800
Hg	0.6 – 56	6
Mn	32 – 9870	260
Mo	40	10
Ni	5 300	80
Pb	13 – 26 000	500
Sr	Nd – 2230	150
Se	1.7	5
V	15 – 400	36
Zn	101 – 49 000	1700

Métal ou Élément trace		
Métal ou Élément trace	Fourchette de concentrations (mg/Kg de boue sèche)	Valeur médiane (mg/kg)
Ag	Nd – 960	90
As	230	10
B	4 – 1 000	33
Ba	Nd – 300	1300
Cd	1 – 3 410	15
Co	1 – 260	10
Cr	10 – 99 000	500
Cu	84 – 17 000	800
Hg	0.6 – 56	6
Mn	32 – 9870	260
Mo	40	10
Ni	5 300	80
Pb	13 – 26 000	500
Sr	Nd – 2230	150
Se	1.7	5
V	15 – 400	36
Zn	101 – 49 000	1700

Métal ou Élément trace	Fourchette de concentrations (mg/Kg de boue sèche)	Valeur médiane (mg/kg)
Ag	Nd – 960	90
As	230	10
B	4 – 1 000	33
Ba	Nd – 300	1300
Cd	1 – 3 410	15

Fourc
conce
(mg
boue

Co	1 – 260	10	
Cr	10 – 99 000	500	
Cu	84 – 17 000	800	
Hg	0.6 – 56	6	
Mn	32 – 9870	260	
Mo	40	10	
Ni	5 300	80	
Pb	13 – 26 000	500	
Sr	Nd – 2230	150	
Se	1.7	5	
V	15 – 400	36	
Zn	101 – 49 000	1700	
Ag			Nd
As			2
B			4 –
Ba			Nd
Cd			1 –
Co			1 –
Cr			10 –
Cu			84 –
Hg			0.6
Mn			32 –
Mo			
Ni			5
Pb			13 –
Sr			Nd
Se			
V			15
Zn			101 –

Nd: Non déterminée

Tableau 7. Exemple de composition des boues séchées et chaulées en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000).

Elément (en mg/kg)	Valeur (mg/kg)
Fe	1125
Zn	490
Mn	61
Cu	48

Tableau 8. Teneurs en éléments traces des boues résiduelles issues d'une station pilote de lagunage à Ouarzazate au Maroc (Xanthoulis, 1996)

Elément	Boues de la station pilote de Ouarzazate (mg/kg MS)
Cd	0,62 – 2,6
Cu	127,4 – 93,8

Ni	26,7 – 33,4
Pb	149,5 – 172,1
Zn	157,0 – 1743,1
Hg	0,93
Cr	50,0
Co	13,3 – 17,4
Mn	195,0 – 224,9

Comme on va le constater plus loin, les concentrations en éléments traces, aussi bien dans l'exemple d'Algérie que celui du Maroc, sont généralement inférieures aux valeurs limites. Une exception peut être faite pour le cas du zinc.

Pour le cas des teneurs en éléments traces métalliques, les analyses effectuées dans plus de dix grands STEP en Tunisie ont révélé des valeurs nettement inférieures aux seuils fixés par la Norme Tunisienne.

2.4.3. Composés organiques toxiques

Très peu d'études ont concerné la composition et la dynamique des composés organiques ou micro - polluants organiques toxiques présents dans les boues. Ceci peut être expliqué par le fait que ces composés ne sont pas absorbés par les plantes comme c'est le cas des éléments traces métalliques. Une fourchette de concentrations est rapportée à titre indicatif dans le tableau 9.

Tableau 9. Composés organiques toxiques pouvant être trouvés dans les boues résiduaires (Données citées par Elliott, 1984).

Composé	Fourchette de concentrations (mg/kg de boue sèche)	Valeur médiane (mg/kg de boue sèche)
Anthracène	34 – 1565	272
Benzène	1-17725	577
Butylbenzylphthalate	2-401	16
Chlordane	3-30	–
Dieldrine	0.3-2.2	0.16
Hexachlorobutadine	10-675	338
PCB's	1.2-105	3.20
Phénol	27-4310	123
Toluène	54-26857	722
Trichloro – éthylène	2-1927	57
Chlorure de vinyl	145-3292	250

Ces micropolluants organiques sont soumis, dans le sol, au processus de biodégradation. Selon la littérature, le temps de demi-vie varie selon le type de composés de quelques mois à plus de 10 années.

2.4.4. Pathogènes

Les boues, véhiculent à l'état frais, plusieurs types de pathogènes : des bactéries, des virus et des parasites. Ces organismes se concentrent en général dans les boues par sédimentation dans le bassin anaérobie. Le tableau 10 relate la liste de pathogènes généralement rencontrés dans les boues résiduaires non traitées.

Tableau10. Les pathogènes communément rencontrés dans les boues résiduaires et les maladies qui leur sont associées (Selon différentes sources citées par Hunt (1984))

Type d'organisme	Pathogène
Bactérie	Salmonelle Mycobactérium Shigella Esherichia Coli Leptospires
Virus	Enterovirus Adénovirus Virus hépatique
Protozoaire	Toxoplasme Giardia
Nématodes ou helminthes Cestodes	Ascaris Toxocara Ténia

Les teneurs moyennes des boues résiduaires en pathogènes sont rapportées, à titre indicatif, dans le tableau 11.

Tableau 11. Les niveaux moyens de germes pathogènes dans les boues issues d'une digestion anaérobique (rapportés par Elliott, 1984 à partir de plusieurs sources)

Organisme	Unité	Moyenne
Coliformes Totaux	10^6 / 100 ml	30.0
Coliformes Fécaux	10^6 / 100 ml	2.0
Streptocoques Fécaux	10^6 / 100 ml	0.9
Salmonelles	par 100 ml	29.0
Pseudomonas	par 100 ml	34.0
Entérovirus	PFU/100 ml	79.0

PFU : Plaque – Forming Unit (Unité formant plaque ; les plages sont formées par destruction de cellules)

En général les bactéries et les virus n'ont pas une grande survie dans le sol à cause de leur faible compétitivité (Elliott and Ellis, 1977). Leur survie dépend également de plusieurs facteurs édaphiques et environnementaux : la température, l'ensoleillement, l'humidité, la matière organique du sol, le pH et la texture du sol (Watson, 1980; Pahren *et al.*, 1979).

Le tableau 12 relate des ordres de grandeur de la durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante.

Tableau 12. Durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante (Doran et al. 1976)

Organisme	Durée de survie (en jours)	
	Surface de la plante	Dans le sol
<i>Bactéries</i>		
Salmonelle	1-42	7-168
Shigella	1-7	
Mycobacterium	10-49	90-450
Leptospira		15-43
Erysipelothrix		21
<i>Virus</i>		
Entérovirus	4	27-170
Poliovirus		32
<i>Parasites</i>		
Entamoeba histolytica	3	8
Ascaris lumbricoides ova	27-35	2-6 <u>ans</u>

Une tentative de faire le point des travaux sur la survie des bactéries et des virus dans le sol, après application des boues résiduaires, permet d'émettre les principaux constats suivants :

- la période d'application conditionne de manière significative la survie des virus. Le temps de survie varie de quelques jours pour une application estivale, à trois mois pour une application hivernale ;
- les températures élevées au niveau de la surface du sol et la dessiccation sont des facteurs importants d'élimination des virus et des bactéries;
- La texture du sol, et par conséquent la surface spécifique ainsi que la CEC, favorisent l'adsorption des virus ce qui augmente leur survie tout en les gardant hors hôtes;
- La contamination des eaux souterraines par les virus est possible dans les sols de texture très grossière.

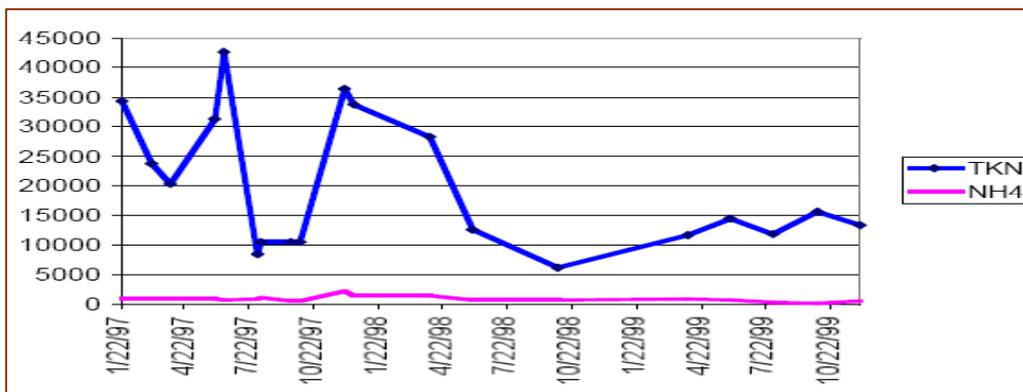
On peut déduire de ce qui précède que les conditions climatiques, notamment la température et l'ensoleillement, dans la région d'Afrique du Nord et du Moyen Orient sont très favorables à l'élimination des bactéries et des virus.

2.5. Constat général sur la composition des boues

En ce qui concerne la composition des boues, un certain nombre de constatations sont rapportées dans l'encadré 3.

Encadré 3. Constats sur la composition des boues

- La teneur en matière organique est variable selon les types de boues.
- Les teneurs en éléments nutritifs sont variables d'une boue à l'autre et pour un même type (Vor exemple ci-après).



- Le rapport C/N et le pH sont aussi des paramètres très variables.
- Le traitement des boues par chaulage ou compostage induit des variations notables dans la composition organique et minérale des boues.
- Les teneurs en éléments traces sont très variables à cause de différents facteurs : principalement, l'activité industrielle par son intensité et sa nature, la corrosion des conduites d'eau, le ruissellement des eaux de pluie sur les toits et les rues, l'activité commerciale ou artisanale (garages, cabinets dentaires, laboratoires...)
- La variabilité de la composition a également des conséquences importantes sur la valeur nutritive des éléments et sur la biodisponibilité des métaux lourds. En effet, l'azote se minéralise plus rapidement lorsque le rapport C/N est supérieur à 8. De même, les métaux lourds sont plus solubles et donc plus "biodisponibles. Ils possèdent une phytotoxicité potentielle plus élevée lorsque le pH est acide.
- Cette variabilité de concentrations de différentes substances a pour conséquence que l'application de boues pour satisfaire les besoins en un élément peut générer une carence ou un excès en un autre élément.
- Les boues véhiculent des germes pathogènes qui peuvent être éliminés par des traitements appropriés. Ces pathogènes se caractérisent par des périodes variables de survie selon les conditions du milieu.

3. Impacts négatifs des boues résiduaires non traitées

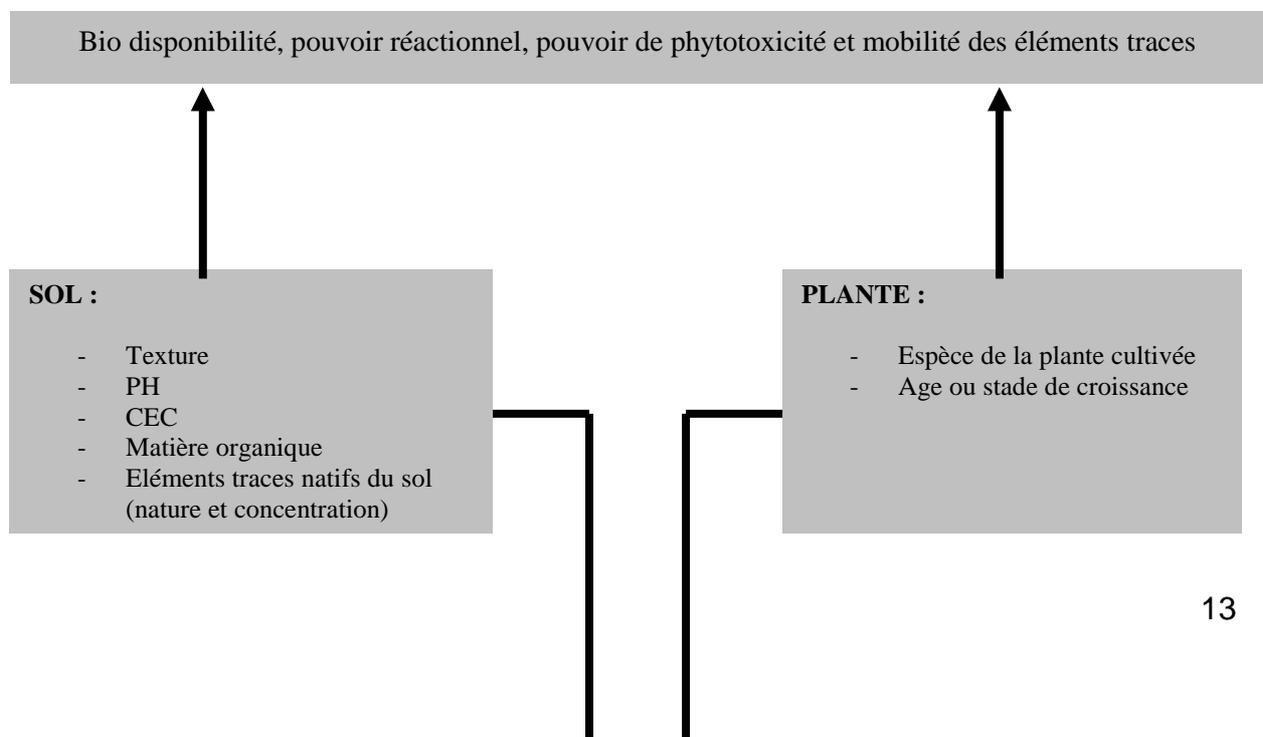
3.1. Impact des éléments traces

L'application des boues résiduaires aux sols cultivés peut causer une contamination du sol, une phyto – toxicité et une accumulation des métaux dans les produits agricoles consommés par l'Homme ou l'animal. Selon Chaney (1980), les éléments traces peuvent être scindés en cinq catégories :

- Les éléments traces qui sont très peu solubles dans le sol et par conséquent ne s'accumulent pas dans les tissus des plantes (Pb, Hg, Cr, F, Ag, Au, Ti, Sn, Si, Zr).
- Les éléments traces qui sont absorbés par les racines mais demeurent non solubles et ne sont pas transportés vers la partie aérienne (Fe, Al et occasionnellement Hg et Pb).
- les éléments traces qui, appliqués en grandes doses, induisent une phyto-toxicité (Zn, Cu, Ni, Co, Mn, As, B).
- Certains éléments comme le Cd, le Mo et le Se, n'appartenant pas à ces trois catégories, peuvent être présents en quantités plus ou moins appréciables dans les boues résiduaires. Ces éléments peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et animale.
- D'autres éléments traces, pouvant être accumulés dans les tissus végétaux sans induire des effets de phyto-toxicité, peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et animale.

Il est communément connu que les éléments traces les plus rencontrés dans les boues résiduaires sont : Cd, Cu, Mo, Ni, Pb et Zn.

Le problème lié aux éléments traces s'exprime de manière plus ou bien marquée en fonction des propriétés du sol (pH, matière organique, Capacité d'Echange Cationique), de l'espèce et du stade phénologique de la plante cultivée et du type d'élément trace. La figure 1 illustre ces différentes inter – relations.



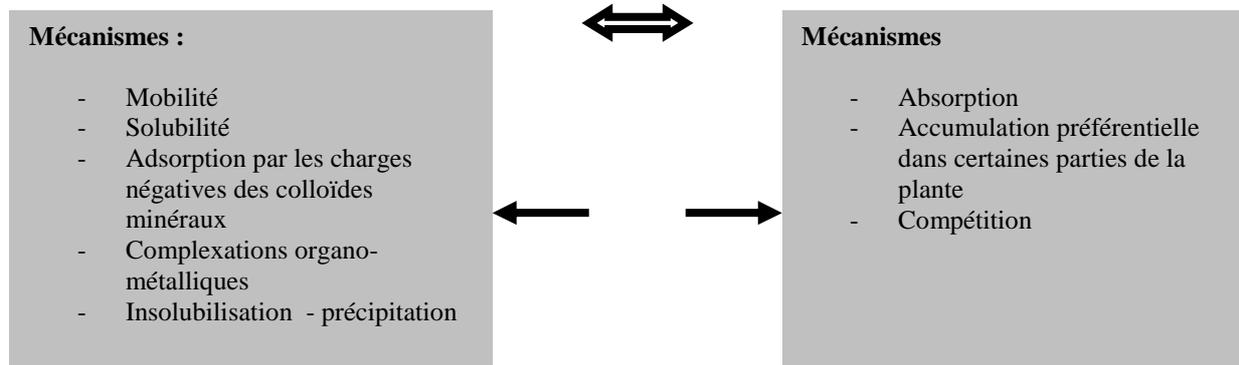


Figure 1. Interrelations entre les éléments traces, le sol et la plante (Soudi, 2000)

3.2. Impact des germes pathogènes

Les principales maladies causées par les germes pathogènes présents dans les boues sont rapportées dans le tableau 13.

Tableau 13. Principales maladies associées aux pathogènes des boues résiduaires

Type d'organisme	Pathogène	Maladie
Bactérie	Salmonelle	Typhoïde
	Mycobactérium	Tuberculose
	Shigella	Dysenterie
	Esherichia Coli	Gastro-entérite
Virus	Leptospires	Leptospirose
	Enterovirus	Gastro-entérite, polio
	Adénovirus	Maladie respiratoire
	Virus hépatique	Hépatite
Protozoaire	Toxoplasme	Toxoplasmose
	Giardia	Gastro-entérite
Nématodes ou helminthes	Ascaris	Ascarioses, pneumopathies
	Toxocara	Migraines
Cestodes	Ténia	Cysticercose

Les organismes pathogènes ne se retrouvent pas uniquement dans le sol ou sur la plante mais peuvent suivre, comme le montre la figure 2, d'autres voies de transfert directes ou indirectes vers l'Homme ou l'animal.

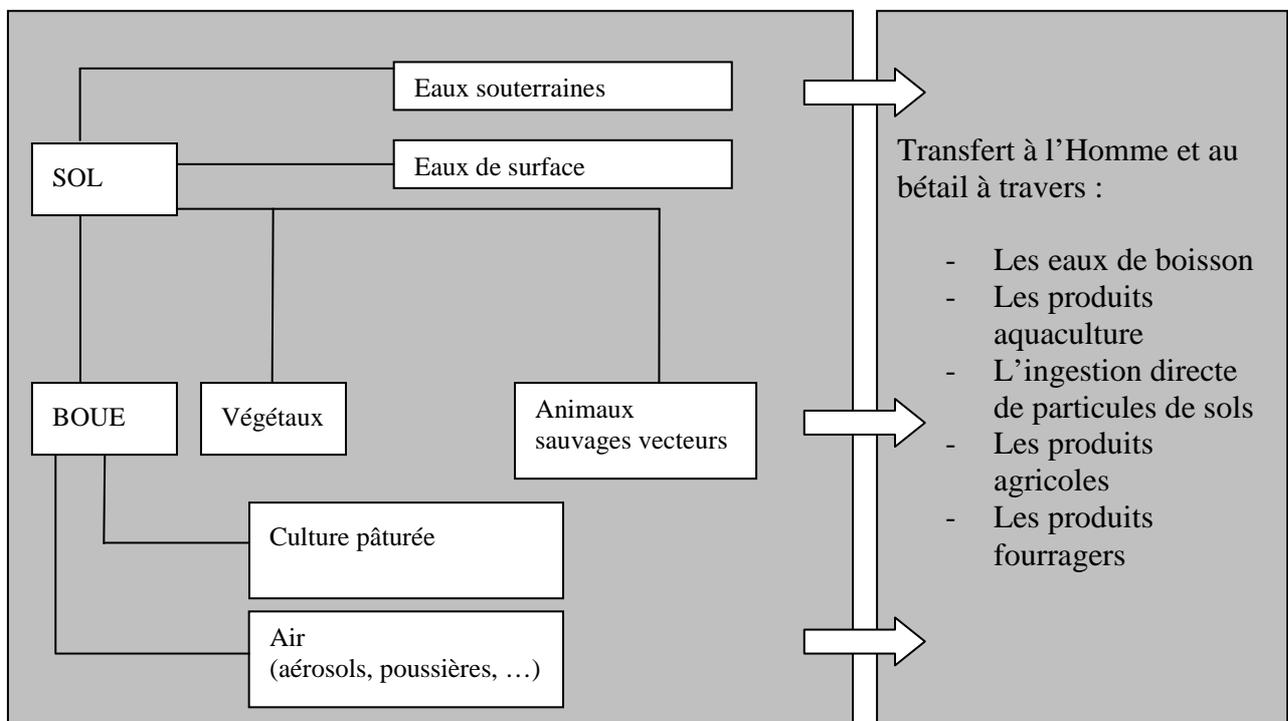


Figure 2. Les différentes voies d'exposition menant des organismes pathogènes présents dans les boues aux cibles (Notes de cours de pollution du sol (Souidi, 2000))

4. Filières de traitement des boues et mesures d'atténuation des impacts négatifs

4.1. Introduction

Rappelons que deux risques majeurs sont liés à l'utilisation des boues : la présence de pathogènes et des éléments traces métalliques.

En ce qui concerne les pathogènes, l'élimination des risques consiste en un traitement préalable des boues avant leur épandage. A ce niveau trois principales questions demeurent à l'ordre du jour et constituent toujours le noyau d'un débat:

- Quel type de procédé choisir en tenant compte de sa faisabilité économique ?
- Quel type de traitement et pour quel type d'usage ?
- Quels sont les procédés viables dans les pays en développement ?

Le point sera fait sur les filières de traitement en soulignant leurs avantages et inconvénients. Ensuite, les techniques pouvant être adoptées dans les pays du proche orient seront proposées.

Une démarche similaire sera adoptée pour la gestion des contraintes liées à la présence des éléments traces. Le point sur les normes internationales en vigueur sera fait et une adaptation de ces normes au contexte des pays du proche orient sera tentée. Cela se fera en prenant en compte les activités génératrices de ce type de pollution métallique et les paramètres du sol en relation avec la réactivité et la bio-disponibilité des éléments traces.

4.2. Point sur les filières de traitement et d'évacuation des boues

Les principales filières et étapes de traitements et d'évacuation des boues résiduairees sont reprises dans la figure 3, catégorisées et commentées dans le tableau 14 et l'encadré 4.

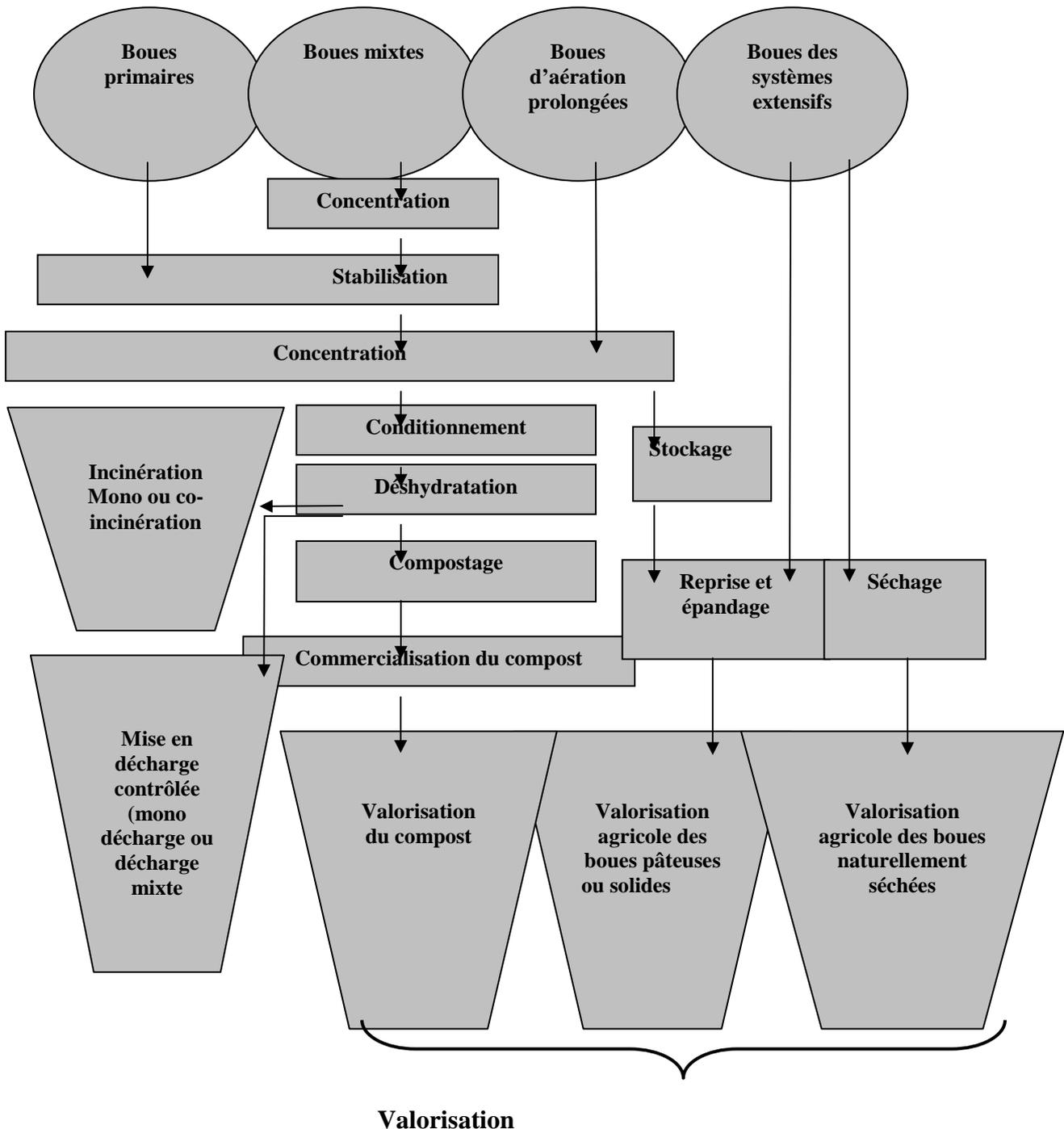


Figure 3. Schéma général des filières de traitement et d'évacuation des boues résiduairees (adaptée de Duchène, 1990)

Tableau14. Procédés de traitement des boues résiduaires (Département de l'Environnement au Royaume Uni, 1989)

Procédé	Description
Pasteurisation thermique	Minimum de 30 minutes à 70°C ou minimum de 4 heures à 55° C (ou conditions intermédiaires appropriées), suivie dans tous les cas par une digestion primaire mésophile anaérobique
Digestion anaérobique mésophile	Temps de séjour minimal de 12 jours en digestion primaire à 35°C +/- 3°C ou au moins de 20 jours en digestion primaire à 25°C +/- 3°C suivie dans chaque cas par une étape secondaire qui exige un temps d'au moins 14 jours
Digestion thermophile aérobie	Période moyenne de rétention d'au moins 7 jours. La totalité des boues doit être soumise à une température minimale de 55°C pour une période d'au moins 4 heures.
Compostage en andains retournés	Les boues en compostage doivent être maintenues au moins pendant 4 heures durant une période de 5 jours à la température de 55 °C en assurant une période suffisante de maturation
Stabilisation à la chaux des boues liquides	Addition de chaux pour augmenter le pH à la valeur de 12 pendant au moins 2 heures
Stockage liquide	Stockage des boues liquides non traitées pendant au moins 3 mois
Déshydratation et stockage	Conditionnement des boues avec de la chaux ou d'autres flocculants suivi par la déshydratation ; le stockage final de la matière sèche doit s'étendre sur une période minimale de 3 mois Si la boue a subi un traitement primaire par digestion, le stockage doit être fait sur une période minimale de 14 jours

**Encadré 4. Catégories des principales filières de traitement et d'évacuation des boues
(adapté de Duchène, 1990)**

Catégorie 1. Pré traitement simple

Séchage sur lits de séchage associé aux systèmes extensifs d'épuration des eaux usées

Catégorie 2. Pré traitements élaborés

- *Stabilisation*: opération permettant d'arrêter les évolutions ultérieures accompagnées de nuisances
- *Concentration*: Elimination d'une partie de l'eau contenue dans l'espace interstitielle afin d'éviter son transport

Catégorie 3. Optimisation de la gestion d'évacuation

- *Stockage*: opération permettant d'assurer un équilibre entre la capacité d'extraction et la capacité d'évacuation
- *Homogénéisation*: opération permettant de donner au destinataire final un produit de nature relativement constante

Catégorie 4. Modification des caractéristiques

- *Conditionnement*: modification des caractéristiques de la boues finale pour permettre de la séparer en deux phases : phase liquide et phase solide
- *Déshydratation*: Augmentation de la siccité pour rendre le produit solide ou pâteux

Catégorie 5. Valorisation agricole directe ou après les opérations de séchage et de compostage

Catégorie 6. Non valorisation: mise en décharge contrôlée ou incinération après concentration et déshydratation

Le tableau 15 met en relation les principales filières de traitement des boues avec les conditions d'utilisation en agriculture.

Tableau 15. Les filières de traitement en relation avec l'utilisation des boues en tant que produit d'amendement du sol (d'après différentes sources synthétisées par Elliott, 1984)

Procédé de traitement	Fonction	Pourcentage typique de la teneur en matière sèche	Considérations d'usage
<p>Epaississement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gravité - Flottation 	Evacuation de l'eau	5 - 10	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration élevée en pathogènes - Boues non recommandées pour l'usage agricole
<p>Stabilisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Oxydes de chlore - Chaux - Digestion anaérobique - Digestion aérobie - Traitement thermique 	Stabilisation de la matière organique et réduction de pathogènes et des odeurs	4 - 12	<ul style="list-style-type: none"> - Les boues restent à l'état fluide - La digestion anaérobique conserve les éléments nutritifs - Des pertes d'azote par volatilisation de l'ammoniac et la fixation de phosphore ont lieu dans le cas d'une boue chaulée
<p>Conditionnement</p> <ul style="list-style-type: none"> - Additifs chimiques - Traitement thermique 	Modification des propriétés de la boue pour assurer une déshydratation	-	<ul style="list-style-type: none"> - Les additifs chimiques peuvent modifier le pH de la boue et la disponibilité des éléments nutritifs - Le traitement thermique détruit et désactive la plupart de germes pathogènes
<ul style="list-style-type: none"> - Déshydratation mécanique - Filtration sous vide - Filtration sous pression (à l'aide de filtre - presse) - Centrifugation - Lits de séchage 	Elimination de l'eau	15 - 30	<ul style="list-style-type: none"> - La boue est semi - humide - Il y a perte d'éléments nutritifs dans la phase liquide lorsque la boue est déshydratée mécaniquement
<p>Séchage</p> <p>Types de séchage :</p> <p>Séchage en lits plantés</p> <p>Séchage naturel</p> <p>Séchage sus serres ventilée</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evacuation de l'eau - Réduction de matière solide 	90	<ul style="list-style-type: none"> - La boue joue le rôle de conditionneur et fertilisant du sol - Suppression de la majorité de germes pathogènes
Compostage	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de volume - Récupération de ressources 		<ul style="list-style-type: none"> - Le compost est un bon conditionneur du sol - Réduction du pool d'éléments nutritifs - La suppression de la plupart des germes pathogènes

4.3. Répartition des filières adoptées dans les pays industrialisés

L'examen des modes d'élimination des boues en Europe et aux Etats-Unis, exposés dans le tableau 16, montre qu'une proportion importante du tonnage de boues produites dans ces pays est destiné à l'épandage agricole. Cette option commence à dominer et être pérennisée par la politique européenne par rapport aux autres filières de mise ne décharge contrôlée ou d'incinération.

Tableau 16. Tonnages et modes d'élimination des boues en Europe et aux Etats-Unis (ADEME - Traitement OPECST)

Pays	Répartition				
	Agriculture	Décharge	Incinération	Rejets	Autres, compostage...
Belgique (Wallonie)	90 %	10 %	-	-	-
Belgique (région Flamande)	20 %	60 %	20 %	-	-
Danemark	67 %	13 %	20 %	-	-
Allemagne	40 %	48 %	11 %		1 %
Grèce	10 %	90 %	-	-	-
Espagne	46 %	25 %	5 %	24 %	-
France (2)	60 %	25 %	15 %	-	-
Irlande	12 %	42 %	-	36 %	10 %
Italie	18%	81%	1%		
Luxembourg	70 %	30 %	-	-	-
Autriche	22 %	32 %	33 %	-	13 %
Portugal	11 %	29 %	-	60 %	-
Finlande	31 %	38 %	-	-	31 %
Suède	35 %	35 %	-	10 %	20 %
Royaume-Uni	46 %	8 %	8 %	25 %	13 %
Moyenne pondérée UE	30 %	52 %	9 %	8 %	1 %
Etats-Unis	55 %	19 %	17 %	-	9 %

Dans les cas cités, le calcul est purement indicatif, qui ne prend pas en compte la part de l'assainissement individuel.

4.4. Récapitulatif sur les filières de traitement des boues

L'examen des filières de traitement et d'évacuation des boues exposées plus haut permet d'émettre les constats suivants :

- l'incinération est une filière très peu recommandée pour des raisons technico-économiques, malgré qu'elle puisse se justifier dans le cas des grandes stations d'épuration
- la mise en décharge mixte contrôlée (déchets municipaux et boues) constitue une filière à envisager lorsque les terrains agricoles ne sont pas disponibles sur un rayon de 3 Km ou lorsque les boues sont très concentrées en éléments traces. Toutefois, cette option pose une contrainte qui réside dans le fait que les gestionnaires des déchets municipaux expriment une faible acceptabilité des boues dans les décharges car elles augmentent la quantité des lixiviats, réduisent la durée de vie de la décharge etc. D'ailleurs, une siccité d'au moins 30% est obligatoire pour la mise des boues en décharge mixte.
- La mise en mono décharge (boues seulement) n'est pas une option très recommandée mais peut parfois s'imposer en cas de non faisabilité des autres filières d'élimination et/ou de valorisation.

Le traitement des boues à la chaux est une technique largement justifiée dans les pays de régions tempérées occidentales et a fait l'objet de quelques expérimentations ponctuelles en Algérie et en Egypte. Cette technique, dite de stabilisation des boues, est connue par un certain nombre d'avantages : l'augmentation de la siccité des boues traitées par l'apport de matières sèches et par l'extinction de la chaux vive (CaO), la minimisation des risques de fermentation et de dégagement d'odeurs pendant le stockage, la suppression des pathogènes par l'augmentation de pH, l'augmentation de la valeur agronomique par la teneur en chaux éteinte (Ca(OH)_2). Toutefois, cette pratique ne semble pas être très justifiée dans les sols de la région du proche orient car la majorité des sols sont naturellement moyennement pourvus à riches en carbonates de calcium et se caractérisent par un pH neutre à franchement basique. L'apport de chaux risque d'augmenter excessivement le pH et de rétrograder le phosphore sous forme de phosphate bi calcique ou tricalcique.

La voie de valorisation des boues en agriculture constitue une filière écologiquement durable car elle permet de réinsérer les éléments fertilisants dans les cycles de production. Selon différentes sources, la filière d'épandage des boues est une option qui coûte 4 à 5 fois moins cher que l'incinération, et 2 fois moins cher que leur mise en décharge.

4.5. Filières adaptées aux régions de proche orient

L'option de valorisation des boues en agriculture se justifie davantage dans le contexte des pays du proche orient et d'Afrique du nord où les sols sont à plus de 70 % des cas soumis à un climat aride et à des processus de dégradation assez intenses. Leurs teneurs en matière organique sont généralement faibles. Ainsi, l'utilisation des boues comme amendement organique permet, de manière irréfutable, d'améliorer la fertilité des sols tout en économisant les engrais chimiques.

Comme il a été souligné auparavant, la valorisation agricole des boues résiduaires exige leur traitement préalable. Pour cela, les options qui semblent être les plus adaptées au contexte de ces régions sont développées dans les paragraphes suivants.

4.5.1. Le séchage naturel des boues

Il s'agit du séchage naturel des boues dans des lits de séchage associés généralement aux stations d'épuration adoptant des systèmes extensifs mais aussi en systèmes d'épuration intensifs (voir photos 1, 2 et 3). Malgré le désavantage de cette pratique, résidant dans la perte partielle d'éléments nutritifs, elle permet de réduire significativement la teneur en eau et de faciliter la manipulation et le transport. La valeur organique des boues séchées reste entière et permet d'améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols.

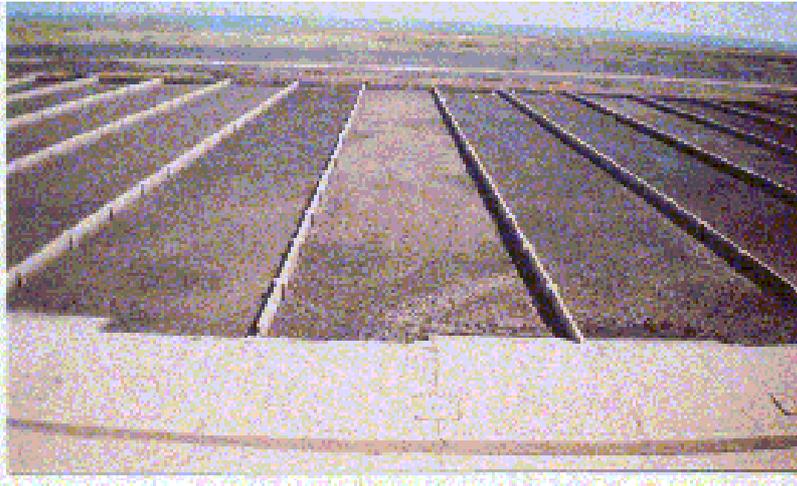


Photo 1. Exemple de lits de séchage des boues, région de Nador, Maroc



Photo 2 : Exemple de lits de séchage, boues séchées à l'avant plan, Ouarzazate, Maroc



Photo 3. Lits de séchage de la STEP de Béja en Tunisie

Ajoutons que le contexte climatique des régions du proche orient et d’Afrique du nord, généralement semi - aride et aride, demeure favorable à cette pratique. L’espace requis ne fait pas non plus défaut dans ces régions.

Sur le plan sanitaire, il a été montré par des essais réalisés au Maroc et plus précisément à Ouarzazate (Xanthoulis, 1996), que les oeufs de parasites ont complètement disparus des boues après 8 mois de séjour dans les lits de séchage (figure 4). La connaissance du niveau de contamination helminthique des boues demeure une priorité si on désire les utiliser en agriculture.

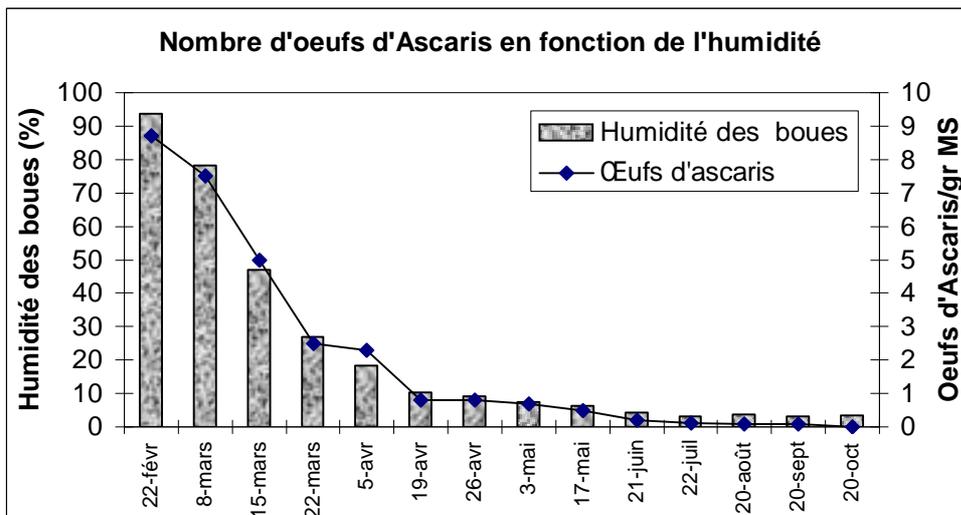


Figure 4. Evolution de l’humidité des boues et du nombre d’œufs d’Ascaris

Après séchage naturel des boues, plusieurs destinations sont possibles:

- L'utilisation directe comme amendement des sols agricoles dans le cas d'un séchage prolongé permettant la suppression des pathogènes,
- Le compostage des boues ou leur co-compostage avec les déchets ménagers ou agricoles et addition ou non d'autres agents structuraux,
- La mise à la décharge lorsque aucune des précédentes destinations n'est envisageable.

4.5.2. Le séchage en lits plantés

Il s'agit d'une technique en développement et consiste en des lits de séchage plantés. Ce type de procédé permet d'amplifier l'élimination de l'eau. En effet, en plus de la percolation par gravité et l'évaporation directe, il y a évapotranspiration par les plantes. Plusieurs types de végétaux peuvent être utilisés dont les plus importantes sont les roseaux (*Genus Phragmites, Phragmites australis*) d'où l'appellation *Phragmicompostage* et certaines graminées. Les lits à roseaux sont généralement privilégiés car ils requièrent moins de travail.

Le produit résultant présente une structure granulaire rappelant celle d'un sol bien structuré et aéré. L'activité biologique mise en œuvre par des micro-organismes et les macro - organismes permet une humification de la matière organique fraîche des boues. Il s'agit donc d'un excellent produit d'amendement des sols.

La photo 4 donne une idée sur les lits plantés.



Photo 4. lit planté en roseaux

4.5.3. Séchage sous serre selon deux procédés :

Dans le cas des zones caractérisées par un fort régime pluviométrique, on peut adopter un séchage sous serre simple. Il s'agit de serres semi-ouvertes latéralement qui protègent les lits contre les pluies. Le plastique de couverture peut être soulevé ou enlevé durant les périodes sèches.

Dans le cas de zones à forte sensibilité de voisinage, un autre procédé sophistiqué a été mis au point et qui consiste à utiliser des serres ventilées. Le retournement des boues se fait de manière télécommandée. Ce procédé est consommateur d'énergie mais des études ont montré que cette consommation est fortement réduite dans les régions ensoleillées.

En somme, on peut dire que le séchage des boues est adapté au contexte des régions d'Afrique du Nord et de Moyen Orient où on dispose d'un grand gisement solaire.

Il est clair que d'autres techniques de séchage thermique existent mais elles se caractérisent généralement par une forte consommation d'énergie et un très faible rendement thermique. Plusieurs recherches d'optimisation sont en cours notamment en Allemagne, en Autriche et en Hollande. .

4.5.3. Compostage des boues

4.5.3.1. Principe et définition du compostage

Rappelons que le compostage consiste en une bioconversion des boues en matière organique stable et riche en substances humiques. Le principe du compostage est illustré par la figure 5.

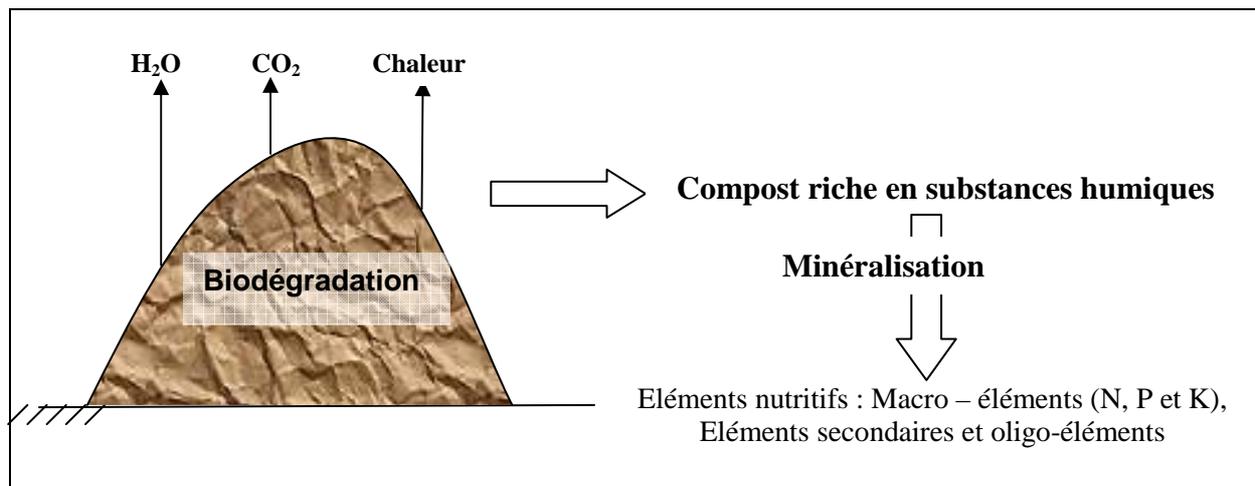


Figure 5. Illustration du principe de compostage (Souidi, 2001)

La technique de compostage la plus adaptée à la région du proche orient et d'Afrique du nord est celle d'andains qui sont périodiquement retournées pour assurer une aération et une biodégradation aérobie. Le procédé de compostage, selon le système d'andains retournés, est schématiquement présenté par la figure 6.

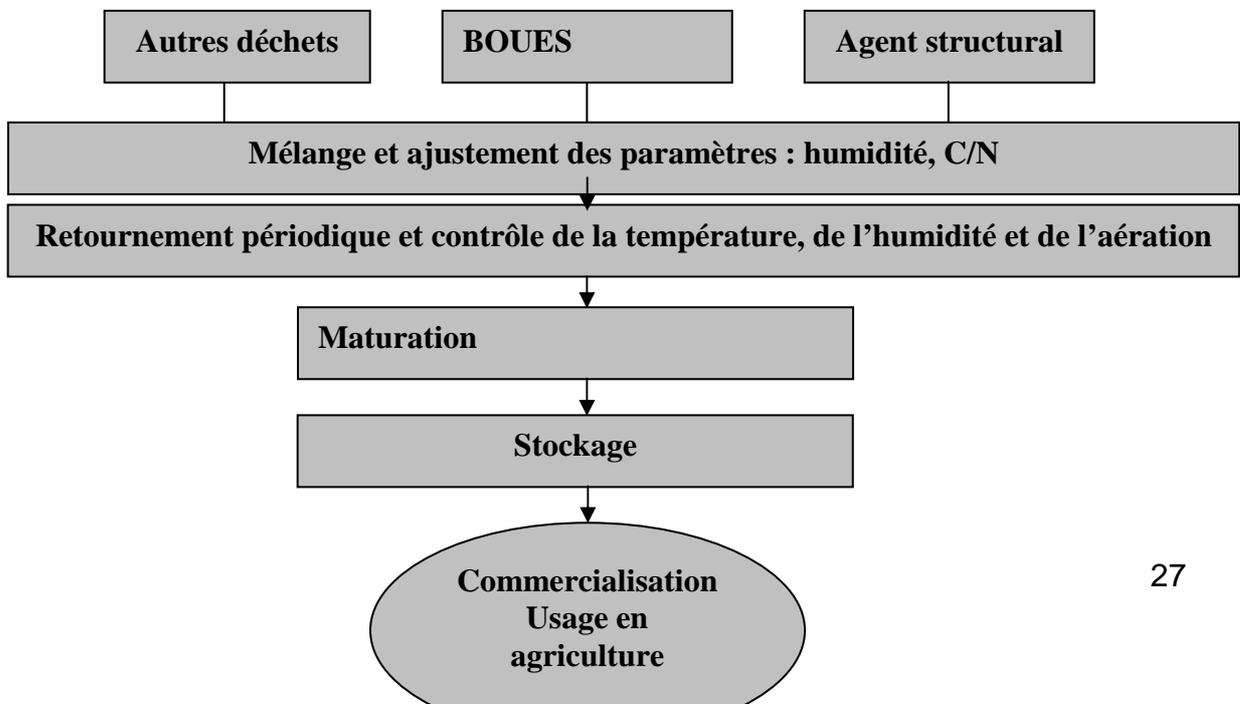


Figure 6. Schéma de la filière de compostage

4.5.3.2. Les principaux avantages du compostage des boues

Malgré la perte d'une fraction des matières fertilisantes initialement présentes dans les boues, l'option du compostage offre de nombreux avantages :

- Une stabilisation et une hygiénisation grâce à la phase thermophile qui a lieu durant le processus de compostage,
- Un stockage sans nuisance environnementale,
- Une réduction de moitié du volume initial des boues,
- Un apport en matière organique riche en humus ce qui transforme le compost de boues en un excellent conditionneur du sol,
- Un épandage propre.

4.5.3.3. Les paramètres de monitoring du compostage

Les paramètres du compostage sont de deux types :

- Les paramètres de démarrage du compostage : le rapport C/N qui doit être autour de 25, et une humidité de l'ordre de 50 %,
- Les paramètres de monitoring ou de suivi du processus de compostage : humidité, température et oxygène lacunaire (aération).

En plus de ces paramètres de contrôle du processus de compostage, il est aussi important de caractériser le compost produit pour s'assurer de sa qualité. Une priorité est accordée aux éléments traces.

4.5.3.4. Eléments de dimensionnement des andains et de l'aire de compostage

Pour assurer un démarrage rapide et un déroulement optimal du processus de compostage des boues, il est recommandé de mélanger les boues avec du compost sec ou d'autres agents structuraux (Tableau 17). Ces additifs peuvent jouer plusieurs rôles :

- Rôle d'agent structural pour garantir une aération optimale du tas en compostage et/ou pour régulariser l'humidité à l'intérieur du tas,
- Rôle d'ajustement du rapport C/N pour ramener le mélange de matières à composter à un C/N de 25 à 35,
- Rôle de diminution des pertes d'azote.

Tableau 17. Quelques agents structuraux et leur rapport C/N

Matière additive	N (en % de Matière sèche)	C/N
Tiges de maïs	0.6-0.8	60-73
Paille	0.3-1.1 (0.7)	48-150 (80)
Ecorce de bois de feuillus (arbres à feuillage caduc)	0.1-0.4 (0.24)	116-436 (223)
Ecorce de bois de résineux	0.04-0.39 (0.14)	131-1285 (496)
Papier de journal	0.06-0.14	398-852
Sciure de bois	0.06-0.8	200-750
Copeaux de bois	0.04-0.23 (0.09)	212-1313 (641)
Feuilles	0.5-0.13 (0.9)	40-80 (54)

Il est important d'établir un bilan de masse pour un bon dimensionnement du dispositif de compostage. Les principaux éléments de ce bilan, devant être considérés aux différentes phases du processus et pour les différents matériaux mélangés, sont les suivants :

- Tonnage total des boues
- Fraction totale du solide (masse et volume)

- Volume et masse de l'eau
- Densité apparente

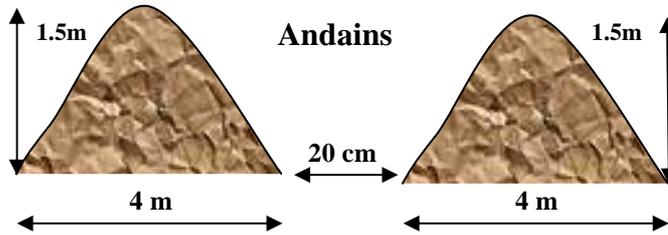
Des valeurs typiques de densité des boues à l'état brut et à différents niveaux de processus sont rapportées dans le tableau 18.

Tableau 18. Valeurs typiques de densité apparente des boues aux différentes phases du processus (EPA, 1985)

Matière ou produit	Densité (Kg/m³)
- Boues brutes (20 % de matière solide)	1070
- Boues digérées (20 % de matière solide)	980
- Sciure de bois neuve	325
- Sciure de bois utilisée	475
- Compost non criblé	595
- Compost criblé (1 cm)	685
-	

Les dimensions optimales des andains, généralement préconisées, sont : hauteur de 1.5 à 2 m ; largeur basale de 2 à 4 m et longueur variable selon la quantité et la disposition spatiale des andains. Un exemple de calcul de dimensionnement des principales unités de l'aire du compostage est illustré par l'encadré 5.

Encadré 5. Illustration du calcul et de dimensionnement de l'aire de compostage des boues (inspiré de Hebette, 1996)



On se propose de dimensionner l'aire de fermentation pour composte les boues d'une station d'épuration des eaux usées d'une localité de 10 000 habitants. On considère une production de boues de 400 l par habitant raccordé. Les boues sont mélangées avec de la sciure de bois (de densité de 600 kg/m³) selon un ratio Sciure : Boues de 2.5 : 1. Le volume total à composter est de 14 000 m³/an

Calcul de l'aire de fermentation et de maturation

- Le volume par mètre de l'andain (m³/m) : $(4 \times 1.5)/2 \times 1 = 3 \text{ m}^3/\text{m}$.
- La surface de l'andain (m²) : 4.2 m².
- Densité moyenne selon le tableau 18 : 800 kg/m³.
- Le volume total à composter (boues et sciure de bois) : 14 000 m³/an soit 270 m³/semaine.
- Pour 8 semaines de fermentation et 6 semaines de maturation, le volume obtenu est de 270 m³/sem * 14 sem = 3780 m³.
- Comme il y a 3 m² par mètre d'andain, il faut 1200 m d'andains qui correspond à 1260 m. x 4.2 m²/m soit 5292 m².

Calcul de l'aire de dépôt des déchets en vrac

On a 14 000 m³/an soit un tonnage corrigé sur base d'humidité et de densités des matières premières (boues et sciure) de 6640 tonnes de déchets brut/an.
 Cette quantité correspond à un volume de 170 m³/semaine.
 Si les tas déposés ont une hauteur de 1.5 m, la superficie requise est de 114 m².
 On peut prévoir une superficie de 150 m².

Calcul de l'aire de tamisage et de stockage final

6640 tonnes de boues par an se convertissent à 3320 tonnes de compost par an (réduction de 50 % au cours du compostage).
 La production par semaine de 6 jours est de 109 tonnes ce qui correspond à un volume de 156 m³/semaine.
 Si la durée de stockage avant utilisation ou commercialisation est de 15 jours, la quantité à stocker est de 218 tonnes ce qui correspond approximativement pour une densité de compost criblé de 700 kg/m³ à une aire de stockage de 306 m².
 Si l'entreposage se fait sur une hauteur de 2 m il faut une superficie de 158 m² à laquelle il faut ajouter une superficie d'environ 50 m² pour l'opération du tamisage soit au total 200 à 220 m².

Résumé :

- Aire de fermentation : 5600 m²
- Aire de dépôt des déchets réceptionnés en vrac : 150 m²
- Aire de stockage final du compost tamisé : 250 m²

Soit au total 6000 m² pour une station d'épuration de type lagunage qui produit 4 000 m³ de boues qu'on composte avec la sciure de bois ou d'autres matériaux ou déchets disponibles à proximité. On peut retenir un chiffre moyen de 1 à 1.5 m²/m³ de boues brutes.
 D'autres variantes de calcul peuvent être faites lorsque les boues sont préalablement séchées ou lorsque d'autres types de mélanges sont adoptés.

4.5.3.5. Conseils pratiques

Quelques conseils pratiques permettant de mieux contrôler le processus de compostage sont rapportées dans l'encadré 6.

Encadré 6. Conseils pratiques pour une meilleure maîtrise du compostage (Soudi, 2001)

- Ajuster le C/N avec des matières organiques carbonées,
- Arroser les tas si les boues sont totalement séchées ou ajuster l'humidité à environ 50 % si les boues sont semi-humides,
- Former des andains selon les dimensions indiquées plus haut,
- Retourner les andains pour les aérer tous les 3 à 7 jours (exemple le 2^{ème}, 6^{ème}, 10^{ème}, 14^{ème} et 18^{ème} jour),
- Veiller, au moment du retournement, à placer les couches superficielles du tas au centre du nouveau tas pour permettre à toutes les particules de subir une température élevée,
- Arroser modérément le tas au moment du retournement et particulièrement à partir de la seconde semaine de la phase active de compostage,
- Eviter à ce que la teneur en eau ne dépasse pas 60 % pour ne pas créer des conditions d'anaérobiose,
- Continuer ces interventions sur une période minimale de 3 semaines jusqu'à stabilisation de la chute de température. Ceci indique la fin de la phase active du processus de compostage,
- Si la température augmente au delà du seuil admissible (65-68°C), augmenter le nombre de retournements,
- À la fin de l'opération de compostage proprement dit, procéder au criblage manuel ou mécanique pour éliminer les fractions grossières et déplacer les tas vers l'aire de maturation,
- Garder les tas en maturation pendant une période minimale d'un mois. Des retournements occasionnels des tas en maturation sont recommandés, mais ne sont pas obligatoires.

En plus de ces conseils d'ordre technique, il est important d'ajouter deux directives environnementales importantes :

- La nécessité d'imperméabiliser l'aire de compostage et en priorité l'aire de fermentation pour éviter la percolation des lixiviats vers les eaux souterraines ; et
- La mise en place d'un système de drainage des lixiviats vers un bassin d'évaporation. Le plus souvent, l'unité de compostage de boues est voisine de la station d'épuration. Dans ce cas, les lixiviats peuvent être acheminés à la tête du premier bassin anaérobique pour rejoindre le circuit d'épuration.

Du point de vue niveau technologique, il est important de souligner que le compostage peut être artisanal, semi-mécanisé ou totalement mécanisé selon le tonnage de boues à traiter. En cas de mécanisation, la principale machine est une andaineuse – retourneuse. Dans la plupart des cas, cette machine, motorisée par un tracteur, peut être fabriquée localement. Une multitude de types de machines sont disponibles sur le marché.

Dans le cadre d'une approche intégrée de gestion des déchets, on peut procéder au co-compostage de déchets ménagers et des boues résiduaires.

Pour de plus amples détails sur les principes de compostage et les modalités de sa mise en œuvre dans les petites et moyennes communes des pays en développement, il est recommandé de se référer au manuel concernant le compostage et la valorisation des déchets ménagers dans les petites et moyennes communes au Maroc (Soudi, 2001).

4.5.3. Gestion de la contrainte liée aux métaux lourds

4.5.3.1. Considérations générales

Si la suppression des agents pathogènes est possible grâce aux opérations de stablisation, de séchage ou au phénomène de pasteurisation résultant de l'élévation de la température pendant la phase thermophile du compostage, les éléments traces quant à eux, ne peuvent être éliminés. De là, découle la nécessité de gérer cette contrainte pour garantir un usage agricole des boues qui minimise les impacts négatifs générés par ces éléments.

Rappelons que les concentrations en éléments traces dans les boues dépendent en grande partie de types d'activités à l'amont de la station d'épuration. De part les faibles activités industrielles dans les zones rurales et les petites communes, d'une manière générale des pays du proche orient et d'Afrique du nord, le problème de pollution métallique ne se pose pas avec autant d'acuité que dans les pays développés.

4.5.3.2. Point sur les directives et normes d'éléments traces métalliques

Au préalable, on peut dire que la normalisation des éléments traces dans les boues résiduaires est un processus qui est marqué par plusieurs limitations :

- Les normes sont généralement basées sur les concentrations totales or seule la fraction soluble ou bio - disponible doit être considérée
- La faiblesse et la ponctualité des travaux de recherche en matière de dynamique d'éléments traces et de leurs effets sur les plantes cultivées. Les résultats sont très souvent contradictoires à cause des variantes expérimentales adoptées en ce qui concerne le type de boue, le type de sol ou l'espèce végétale de la plante testée
- La grande variabilité des normes proposées par les différents pays
- Les normes présentées ne tiennent pas compte en même temps de tous les paramètres influençant la bio - disponibilité des éléments traces : pH, CEC, texture et matière organique.

Ci-après, les tableaux 19 et 20 rapportent respectivement une série normes d'éléments traces dans les boues et dans les sols agricoles.

Les normes d'éléments dans les sols agricoles dépendent de certaines propriétés comme le pH et la texture. Ces facteurs déterminent la bio disponibilité et la mobilité des éléments traces.

Tableau 19. Teneurs limites en éléments traces métalliques dans des boues (mg/kg MS), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse (D'après : OTV, 1997)

ETATS	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	As	Mn	F	Co
UE	20 à 40	1000 à 1750	1000 à 1750	15 à 25	300 à 400	750 à 1200	100(a)-200(b)	2500 à 4000	-	-	-	-
France	20(a) à 40 (b)	1000(a) à 2000 (b)	1000 (a) à 2000 (b)	10(a) - 20 (b)	200(a)-400(b)	800(a)-1600(b)	-	3000(a)-6000(b)	-	-	-	-
Allemagne	5-10 (c)	900	800	8	200	900	-	200-2500(d)	-	-	-	-
Belgique - Wallonie - Flandre	10 (a) à 20 (b) 12	500 500	600(a) à 1000 (b) 750	10(a) à 16(b) 10	100(a)-300(b) 100	500(a)-750(b) 600	- -	200(a)-2500(b) 2500	- -	- -	- -	- -
Danemark	0.8* - 200**	100*	1000*	0.8* - 200**	30* - 2500**	60*(g)-120*(g)-10000**	-	4000*	25(f) *	-	-	-
Espagne - pH du sol < 7 - pH du sol > 7	20 40	1000 1500	1000 1750	16 25	300 400	750 1200	- -	2500 4000	- -	- -	- -	- -
Grèce	20 à 40	-	1000 à 1750	16 à 25	300 à 400	750 à 1200	-	2500 à 4000	-	-	-	-
Irlande	20	-	1000	16	300	750	-	2500	-	-	-	-
Italie	20	(e)	1000	10	300	750	-	2500	-	-	-	-
Luxembourg	20à40	1000à1750	1000 à 1750	16 à 25	300 à 400	750 à 1200	-	2500 à 4000	-	-	-	-
Pays Bas	1.25	75	75	0.75	30	100	-	300	15	-	-	-
Portugal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Royaume Uni (h)	-	-	-	-	-	1200 (h)	-	-	-	-	1000	-
Suisse	5	500	600	5	80	500	-	2000	-	20	-	60
(a) Valeur de référence (b) Valeur limite (c) Valeur abaissée à 5 mg/kg si épandage sur sols sableux et 5 < pH < 6, sinon 10 mg/kg (d) Valeur abaissée à 2000 mg/kg si épandage sur sol sableux et 5 < pH < 6, sinon 2500 mg/kg (e) Valeur abaissée à 80 mg/kg MS si usage en jardinage domestique sinon 120 mg/kg				(f) Valeur à prendre en compte si usage en jardinage domestique (g) Valeur abaissée à 60 mg/kg si usage en jardinage domestique sinon 120 mg/kg (h) valeurs réglementaires du S.I. n° 1263 (1989) * Valeur exprimée par rapport à la matière sèche ** Valeur exprimée par rapport à la teneur en phosphore (P)								

Tableau 20 Teneurs limites en éléments -traces métalliques dans les sols agricoles (mg/kg sol sec), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse. D'après, OTV (1997)

ETATS	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	As	Mo	F	Co	Ti
UE pH 6 à 7	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 75 (a)	50 à 300	150 à 300(a)	-	-	-	-	-	-
France pH > 6	2	150	100	1	50	100	-	300	-	-	-	-	-
Allemagne	1-1.5 (b)	100	60	1	50	100	10	150 à 200 (b)	-	-	-	-	-
Belgique													
- Wallonie pH > 6	1	100	50	1	50	100	-	150 à 200 (c)	-	-	-	-	-
- Flandre, sols sableux	1	100	50-75 (d)	1	60-45(d)	50	-	150 à 225(d)	-	-	-	-	-
- Flandre autres sols	3	150	140	1.5	75	300	-	300	-	-	-	-	-
Danemark		30	40	0.5	15	40	-	100	-	-	-	-	-
Espagne													
- pH < 7	1	100	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
- pH > 7	3	150	210	1.5	112	300	-	450	-	-	-	-	-
Grèce	1 à 3	-	50 à 140	1 à 1.5	30-75	50 à 300	-	150 à 300	-	-	-	-	-
Irlande													
- pH < 7	1	-	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
- pH > 7	1.5	-	175	1.5	45	75	-	225	-	-	-	-	-
Italie	1.5	(e)	100	1	75	100	-	300	-	-	-	-	-
Luxembourg (f)	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 à 75(a)	50 à 300	-	150 à 300 (a)	-	-	-	-	-
Pays - Bas	0.8	100	36	0.3	35	85	-	140	29	-	-	-	-
Portugal	Les teneurs - limites ne figurent pas dans l'arrêté: celles proposées par l'UE sont à l'étude et devraient être retenues												
Royaume Uni													
- Terres labourées (25 cm)													
pH 5 à 5.5	3(h)	40	80(h)	1(h)	50(h)	300(h)	3	200(h)	50	4	500	-	-
pH 5.5 à 6	3(h)	400	100(h)	1(h)	60(h)	300(h)	3	250(h)	50	4	500	-	-
pH 6 à 7	3(h)	400	135(h)	1(h)	75(h)	300(h)	3	300(h)	50	4	500	-	-
pH > 7	3(h)	400	200(h)	1(h)	110(h)	300(h)	3	450(h)	50	4	500	-	-
Sous pâture (7.5 cm)													
pH 5 à 5.5	3.5(i)	600	130	1.5	80	300	5	300	50	4	500	-	-
pH 5.5 à 6	3.5(i)	600	170	1.5	100	300	5	420	50	4	500	-	-
pH 6 à 7	3.5(i)	600	225	1.5	125	300	5	500	50	4	500	-	-
pH > 7	3.5(i)	600	300	1.5	180	300	5	750	50	4	500	-	-

(a) valeurs peuvent être augmentées de 50 % si le pH du sol > 7 ;

(b) Si sols sableux ayant une teneur en MO < 5 %, les limites en Cd et en Zn sont de 1 et 150 mg/kg MS, sinon de 1.5 et 200 mg/kg;

(c) Si sols sableux ayant une teneur en matière organique < 5 %, la limite est de 150 mg/kg MS, sinon, elle est de 200 mg/kg MS;

(d) Si le pH du sol est > 7, la teneur limite en Cu, Ni et Zn est respectivement égale à 75, 45 et 225 mg/kg de sol sec ;

(e) Test de Bartlet et James (1988) pour estimer la capacité du sol à oxyder Cr (III) en (Cr (VI) : si la quantité mesurée > ou égale à 1*mole de Cr (VI), le sol est déclaré impropre à recevoir les boues;

(f) même que la Directive UE;

(g) Il s'agit de " d'un sol de bonne qualité" très riche en M.O avec au moins 25 % d'argile;

(h) Valeurs réglementaires du S.I n° 1263 (1989);

(i) 3 mg/kg si prairies pâturées, 5 mg/kg si prairies temporaires destinées à la fenaison ou à l'ensilage;

(*) Extrait acide nitrique; (**) extrait nitrate de sodium; (***) Teneur hydrosoluble.

D'autres normes relativement plus anciennes et mettant en exergue l'importance du paramètre pH sont rapportées dans le tableau 21. Ces normes précisent également le taux annuel maximum à ne pas dépasser sur une période de 10 années.

Tableau 21. Concentrations maximales permises des Eléments Potentiellement Toxiques (EPT) dans le sol après application des boues résiduaires et taux annuel maximum d'addition (Département de l'Environnement, Royaume Uni, 1989)

EPT	concentration maximale permise (mg/kg matière sèche)				Taux annuel maximum d'addition des EPT au sol durant une période de 10 ans (kg/ha) ³
	pH ¹ 5.0 < 5.5	pH ¹ 5.5 < 6.0	pH 6.0-7.0	pH ² > 7.0	
Zn	200	250	300	450	15
Cu	80	100	135	200	7.5
Ni	50	60	75	110	3
Cd	3 ⁵				0.15
Pb	300				15
Hg	1				0.1
Cr	400				15
*Mo ⁴	4				0.2
*Se	3				0.15
*As	50				0.7
*F	500				20

* Ces normes ne sont pas sujettes à la Directive 86/278/EEC

¹ Pour les sols ayant un pH dans la gamme de 5.0 < 5.5 et 5.5 < 6.0 les concentrations permises en Zn, Cu, Ni et Cd seront révisées lorsque leurs effets sur les cultures et les animaux d'élevage sont complètement élucidés

² L'augmentation de la concentration de EPT dans les sols à pH supérieur à 7 est appliquée seulement lorsque la teneur du sol en carbonates de calcium est supérieure à 5 %

³ Le taux annuel d'addition de EPT est déterminée par la moyenne sur une période de 10 ans

⁴ Le niveau de sécurité de Mo est de 4 mg/kg. Dans cette situation, il faut tenir compte de la concentration en molybdène natif du sol

⁵ Pour un pH supérieur ou égal à 5

D'autres normes concernant les principaux éléments traces métalliques rencontrés dans les boues sont adoptées pour l'estimation des doses évitant le dépassement des valeurs seuils (Tableau 22). Au lieu du pH, ces normes considèrent la Capacité d'Echange Cationique du sol qui renseigne sur sa capacité d'adsorption et de chélation des métaux lourds dans les complexes organo - minéraux.

Tableau 22. Valeurs cumulatives limites pour les principaux métaux lourds applicables aux sols cultivés en fonction de la CEC*(d'après US. EPA, 1977)

Métal	Teneur cumulative dans le sol en Kg/ha) en fonction de la CEC		
	CEC < 5	5 < CEC < 15	CEC > 15
Pb	560	1120	2240
Zn	280	560	1120
Cu	140	280	560
Ni	140	280	560
Cd	5	10	20

*Capacité d'Echange Cationique exprimée en méq/100 g de sol et pour des valeurs de pH du sol maintenues supérieures à 6.5

Il est déduit de ces normes que dans les sols de texture sableuse, ayant généralement une CEC faible, des valeurs cumulatives plus faibles sont tolérées que dans les sols plus argileux de CEC plus élevée et donc de capacité d'adsorption plus importante. Ces normes ne sont valables que dans les sols ayant un pH supérieur à 6.5. En effet, la plupart des métaux lourds sont solubles et donc toxiques à des pH acides. Lorsque le pH est basique, la plupart de ces métaux précipitent et deviennent faiblement réactionnels.

Etant donné le lien existant entre la CEC et la teneur en argile, d'autres normes plus simples sont basées sur la classe texturale du sol (Tableau 23). Toutefois, ces normes demeurent critiquables dans la mesure où la CEC dépend également de la nature minéralogique des argiles.

Tableau 23. Quantités maximales (en kg/ha) pouvant être accumulées dans les sols (Baker et al., 1984)

Métal	Classe texturale du sol		
	Sablo-limoneux et limon-sableux	Sableux fin – limoneux, sableux très fin limoneux, limoneux	Argilo limoneux, sablo-argilo-limoneux, sablo – argileux et argileux
Cd	0.5	0.5	5
Zn	10	30	60
Cu	5	14	30
Ni	2	6	10
Pb	20	60	110
Cr	20	60	110

4.5.3.3. Tentatives d'adaptation des normes aux pays de proche orient

Dans les tentatives de propositions de normes d'éléments traces pour ces régions, on se propose de considérer la notion de Teneur Limite Cumulative (TLC) dans le sol. En effet, la teneur des éléments traces dans les boues est une donnée qui détermine la dose d'application en vue de respecter la norme TLC. Il est clair qu'une boue assez riche en éléments traces rétrécit les possibilités de sa valorisation.

Comme il a été signalé auparavant, les normes présentées ne tiennent pas compte en même temps des facteurs déterminant la bio -disponibilité des métaux lourds. Ces facteurs sont : le pH, la CEC, la texture et la teneur en matière organique. Sachant que la valeur de la CEC est essentiellement déterminée par la texture (principalement la teneur en argile) et la matière organique, les deux seuls paramètres pH et CEC peuvent être considérés dans les tentatives de normalisation.

La plupart des sols du proche orient et d'Afrique du nord, à l'exception de quelques zones isolées, le pH des sols est à dominance neutre à franchement basique. Dans ce contexte, les seuils tolérés peuvent être majorés par rapport à la plupart des valeurs limites des pays du nord de l'Europe où les sols sont plus acides.

Sur base du paramètre pH, les valeurs limites proposées en Espagne (Tableau 19) peuvent être adoptées. Avec ces normes, une marge de sécurité peut être garantie, considérant la nature des sols de la région du proche orient.

Pour le cas des sols sableux, ces normes peuvent être retenues telles quelles et peuvent être majorées de 25 % à 50 % pour les sols de texture argileuse dotée d'une Capacité d'Echange Cationique (CEC) supérieure à 20 méq/100 g de sol. En effet, le tableau 21 montre qu'un accroissement de la CEC d'environ 10 méq/100 g permet de doubler les teneurs cumulatives maximales. En effet, ce paramètre détermine l'intensité d'adsorption des cations métalliques.

Sur la base des normes exposées et des considérations développées plus haut, et compte tenues des lacunes en matière de recherche dans le contexte des régions considérées, les Teneurs Limites Cumulatives (TLC) guides, rapportées dans le tableau 24, sont proposées.

Tableau 24. Teneurs limites cumulatives des principaux éléments traces dans les sols recevant les boues séchées et/ou compostées (propositions pour les pays du proche orient et d'Afrique du nord)

Elément trace métallique	TLC (mg/kg de sol) pour des sols à pH supérieurs à 7	
	CEC inférieure à 20 méq/100 g	CEC supérieure à 20 méq/100 g
Cd	3	6
Cr	150	300
Cu	210	410
Hg	1.5	3
Ni	112	224
Pb	300	600
Zn	450	900

Les valeurs de la première colonne correspondent aux normes espagnoles pour des sols à pH > 7.

Les valeurs de la seconde colonne sont le double de la première colonne selon une interpolation des normes rapportées par US. EPA (1977).

A titre de comparaison, le tableau 25 rapporte les normes tunisiennes enregistrées NT 106.20 (2002), exprimées en terme de concentration totale maximale admissible (CMA) et terme de flux maximum cumulé (FMC) après 10 années.

Tableau 25. Normes tunisiennes d'éléments traces métalliques

Eléments traces	CMA (mg/Kg de MS de boue)	FMC (g/m ²)
Cd	20	0.06
Cr	500	3.00
Cu	1000	3.00
Hg	10	0.03
Ni	200	0.60
Pb	800	3.00
Zn	2000	9.00

Certaines normes signalées dans le tableau 20, notamment celles du Royaume Uni, basées sur des profondeurs fixes du sol ne semblent pas être défendables. En effet, un labour profond, généralement recommandé pour les sols recevant des applications de déchets, permet de diluer les concentrations en métaux lourds dans la masse du sol.

4.5.4. Gestion de la contrainte liée aux pathogènes

Comme il a été exposé auparavant, les techniques de traitement adaptées aux pays du proche orient et d'Afrique du Nord et permettant une suppression des pathogènes, sont le séchage naturel prolongé, le séchage en lits plantés, le séchage couvert et ventilé latéralement pendant la période hivernale et le compostage des boues. Toutefois, pour plus de prudence, il est jugé utile d'associer aux normes des éléments traces métalliques des normes de parasites.

Selon les directives françaises (Arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles), les seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiénisées sont rapportés dans le tableau 26.

Tableau 26. Seuils de référence pour les teneurs en micro-organismes dans les boues (Directives françaises selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles)

Salmonelles	Entérovirus	œufs d'helminthes pathogènes viables
< 8 NPP/10 g MS	< 3 NPPUC/10 g MS	< 3/10 g MS

NPP : Nombre le Plus Probable

NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques

MS : Matière Sèche

Xanthoulis dans une communication personnelle propose de faire le rapprochement entre les normes en vigueur pour l'irrigation avec les eaux usées et l'épandage de boues sur les terres agricoles. La norme pour l'utilisation d'eaux usées en irrigation limite les parasites à une concentration inférieure à 1œuf/l. L'application d'une lame d'irrigation de 1000mm pour le cas d'une culture annuelle, apporte dès lors une concentration en œufs de parasites inférieure à 10 millions œufs/ha (10 000 m²/ha*1000 l/m²*1 œuf/l). Un apport de boue limité à cette même valeur impliquerait qu'un épandage de 10T de MS/ha garderait la concentration en œufs de parasites dans les boues inférieure à 1000 œufs/kg, soit 1œuf/g de MS.

Selon les normes microbiologiques tunisiennes, les boues doivent avoir une concentration en Coliformes Fécaux inférieur à $2 * 10^6$ CF (en NPP/g de matière sèche). Cette norme est pratiquement le double de celle préconisée en Egypte.

A ce stade, il est très difficile de déduire des seuils adaptés aux pays du proche orient. Ce volet mérite d'être mieux élucidé. Les normes françaises pour le cas des salmonelles et les entérovirus (voir Tableau 26) peuvent déjà être retenues ainsi que, pour les œufs d'helminthes le seuil de 1000 œufs/kg MS avancé par Xanthoulis dans sa communication personnelle.

5. Aspects agronomiques de valorisation des boues

5.1. Valeur fertilisante des boues

L'apport de boues constitue une source très appréciable d'éléments fertilisants et particulièrement azotés et phosphatés. Comme il sera constaté ultérieurement, les teneurs en azote varient en fonction du type de boues : les boues liquides sont généralement plus riches en cet élément que les boues séchées et/ou compostées. Le tableau 27 montre des ordres de grandeur de la composition des boues en éléments nutritifs majeurs.

Tableau 27. Concentrations moyennes en éléments majeurs (N, P₂O₅ et K₂O) dans les boues résiduaires (valeurs moyennes d'après plusieurs références)

Type de boue	Humidité (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Boue brute séchée à l'air	5 - 40	1.0	0.6 – 0.8	0.2 – 0.4
Boue ayant subi une digestion anaérobique et séchée à l'air	5 - 30	1.1	1.0 – 1.2	0.1 – 0.2
Boue liquide ayant subi une digestion anaérobique	95	0.25	0.5 - 0.7	0.01 – 0.02

Azote

La valeur fertilisante azotée des boues résiduaires, par rapport à un engrais minéral, pour l'année de l'épandage, varie en fonction de plusieurs facteurs. Ces derniers sont : la nature des boues, les conditions climatiques et culturales, la fraction d'azote organique facilement minéralisable et leur teneur initiale en azote minéral. Le taux annuel de minéralisation des principaux types de boues est rapporté dans le tableau 28.

Tableau 28. Taux de minéralisation de l'azote durant la première année d'épandage

Type de boues	Taux de minéralisation annuel de l'azote	Référence
Boue liquide	40 à 60 %	ADEME (2001)
Boue pâteuse	30 à 35 %	ADEME (2001)
Boue sèche	25 à 40 % 40 à 60 %	ADEME (2001) Soudi et Jemali (1998)
Boue chaulée	30 à 40 %	ADEME (2001)
Boue compostée	10 %	ADEME (2001)

La fraction d'azote organique minéralisable et donc bio disponible durant la première année qui suit l'incorporation des boues dans le sol est estimée pour les différents types de boues comme le montre le tableau 29.

Tableau 29. Fraction estimée (en %) d'azote susceptible d'être disponible pour la culture après différents temps d'application et pour différents types de boues (Evanylo, 1999).

Période après application (années)	Boue stabilisée à la chaux	Boue de digestion aérobie	Boue de digestion anaérobie	Boue compostée
0 - 1	30	30	20	10
1 - 2	15	15	10	5
2 - 3	7	8	5	3

La méthode de calcul de la valeur fertilisante équivalente en azote est rapportée dans l'encadré 7.

Encadré 7. Valeur fertilisante azotée (VFN) des boues résiduaires

$VFN = N_{org}(\text{boues en } \%) \times TMA + N \text{ minéral}$

TMa : Taux de Minéralisation annuel (%). Des ordres de grandeur de TMa sont rapportés dans le tableau 27.

Année 1. $VFN = N_{org}(\%) \times 40\% + N \text{ minéral total}$

Année 2. $VFN = N_{org}(\%) \times 40\% + 20\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Année 3. $VFN = N_{org}(\%) \times 40\% + 20\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la deuxième année} + 5\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Années 4 et 5. $VFN = N_{org}(\%) \times 40\% + 20\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la troisième année} + 3\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Phosphore

La concentration en phosphates dans les boues a tendance à augmenter à cause du développement et de la diversification d'usage des détergents synthétiques assez pourvus en phosphates. Comme il a été mentionné auparavant, la concentration en phosphore varie en fonction du type de boue et de la composition des eaux usées brutes. Contrairement à l'azote, le phosphore se trouve dans les boues sous forme minérale (70 à 90 % de phosphore total).

Si la teneur en azote des boues est de 1 à 1.5 fois celle du phosphore, les teneurs des plantes cultivées en azote sont presque de 10 fois celles du phosphore. Ainsi, si la dose des boues appliquée est déterminée sur la base des besoins en azote, la quantité de phosphore peut être excessive par rapport aux besoins des cultures usuelles.

La quantité de phosphore assimilable apportée par les boues est calculée en adoptant un taux de 50 % du phosphore total présent dans la boue. Ainsi, une tonne de boue contenant 2 % de phosphore sur base de matière sèche, apporterait la première année l'équivalent de 23 kg de P_2O_5 /ha ($1\ 000\ kg \times 0.02 \times 0.5 \times 2.29$). Le facteur 2.29 permet de convertir le phosphore (P) en unités fertilisantes conventionnelles exprimées en P_2O_5 .

Potassium

Les concentrations en potassium sont généralement faibles à cause des pertes dans les effluents liquides. Il est en général considéré qu'une proportion de 90% du 90 % du potassium présent dans la boue est disponible la première année d'épandage. Un facteur multiplicatif de 1.2 est utilisé pour convertir le potassium (K) en unité fertilisante conventionnelle (K_2O).

5.2. Valeur fertilisante du compost

La valeur fertilisante totale englobe la valeur minérale, exprimée en terme de fourniture d'éléments nutritifs, et la valeur organique qui se traduit par l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques du sol (Tableau 30).

La valeur minérale du compost varie en fonction de sa qualité qui dépend de la nature du mélange de matières premières (boues et autres déchets) et de la composition initiale des boues. Les analyses du compost permettent de faire une évaluation exacte des éléments nutritifs qu'il contient. A titre indicatif, les ordres de grandeur des concentrations en quelques éléments nutritifs dans le compost des boues sont les suivants :

- N : 1 à 2 %
- P : 0.6 à 1.5 %
- K : 0.5 à 1 %
- Mg : 1 à 1.5 %
- Ca : 3 à 7 %

Etant difficile de quantifier la valeur organique, elle est usuellement équivalente à au moins à 2 fois la valeur minérale.

Tableau 30. Principales actions du compost sur les paramètres de la qualité des sols

Paramètre	Action du compost et conséquences
-----------	-----------------------------------

Stabilité structurale	Augmentation de la stabilité structurale : amélioration de l'aération du sol, de l'activité biologique et racinaire Atténuation de l'érodibilité des sols Amélioration de la circulation de l'eau
Rétention d'eau	Augmentation de la rétention d'eau, en particulier dans les sols sableux
Capacité d'Echange Cationique	Augmentation de la teneur en substances humiques, colloïdes chargés négativement qui augmentent la rétention de cations. Cette action est significative dans les sols sableux
Activité biologique	Augmentation de la résistance des plantes à certaines maladies par le développement des saprophytes, concurrençant les agents phytopathogènes

5.3. Doses d'application

Les étapes de calcul de la dose de boues à appliquer sont illustrées par l'exemple rapporté dans l'encadré 8. Il est toutefois important d'avertir le lecteur sur le fait que les valeurs indiquées dans cet exemple ne constituent pas des recettes. En effet, elles peuvent changer en fonction du niveau de production agricole, du type de sol, du climat et de la qualité des boues. Aussi, comme il a été mentionné plus haut, des considérations liées aux concentrations métalliques doivent être prises en compte pour éviter un dépassement des teneurs limites cumulatives (TLC) . L'exemple montre seulement la démarche de calcul basée sur la composition des boues et les besoins de la culture.

Encadré 8. Exemple de calcul de dose de boues pour une culture de maïs (exemple repris intégralement de Fiche technique 2.1., ADEME (2001))

Etape 1. Calcul des besoins totaux pour un rendement objectif de 90 quintaux/ha

N : 180 Kg/ha (l'azote minéral résiduel dans le sol est pris en compte)

P₂O₅ : 90 kg/ha

K₂O : 60 kg/ha

Etape 2. Connaissance et caractérisation de la boue (cas d'une boue liquide à 6 % de matière sèche)

N : 7 % avec une biodisponibilité de 40 %

P₂O₅ : 5.8 % de la matière sèche avec une biodisponibilité de 70 %

K₂O : 0.9 % avec une biodisponibilité de 100 %

Etape 3. Choix de la dose

Dose satisfaisant le besoins en azote : 107 m³/ha

Dose satisfaisant le besoin en phosphore : 37 m³/ha

Dose satisfaisant le besoin en potassium : 111 m³/ha

Conclusion : la dose la plus faible est retenue soit 37 m³/ha. Cet exemple illustre le rôle de phosphore comme facteur limitant de la dose à appliquer. (37 m³ /ha correspond à 2.2 tonnes de Matière Sèche/ha)

Etape 4. Calcul de la fumure minérale complémentaire

– Azote : 120 kg/ha

– Phosphore : 0

– Potasse : 40 kg

Remarque : Pour: les cultures suivantes, il est nécessaire de tenir compte des reliquats d'azote et de phosphore apportés par les boues

Le tableau 31 donne quelques ordres de grandeurs de doses de boues permettant de satisfaire les besoins en azote et en phosphore pour un certain nombre de cultures.

Tableau 31. Doses d'application de boues permettant de satisfaire les besoins en azote et en phosphore pour quelques cultures (Di Pinto et Minnini, 1985)

Culture	Dose de boues pour équilibrage (Tonnes/ha)	
	Azote	Phosphore
Maïs	6.67	4.44
Blé	4.85	3.56
Céleri	7.77	7.32
Luzerne	12.5	3.56
Moyenne pour diverses cultures	5.27	2.80

5.4. Mode d'application des boues

Le compost doit être enfoui à 10 ou 15 cm de profondeur pour éviter son dessèchement en conditions chaudes, garantir une minéralisation optimale et une libération d'éléments nutritifs.

Les méthodes adoptées pour le traitement des boues peuvent influencer significativement la modalité d'application. Le facteur important réside dans le niveau d'élimination de l'eau. Ainsi deux modes d'application sont communément connus :

- L'épandage des boues liquides à la surface des sols et/ou l'injection dans le sol des boues transportées dans des camions - citernes.

- L'incorporation et l'enfouissement des boues séchées (thermiquement ou à l'air libre) ou compostées dans le sol à une profondeur d'environ 10 cm à 15 cm pour minimiser les pertes d'azote. Dans ce cas, il est recommandé de bien mélanger le compost au sol pour éviter d'avoir une couche de compost isolée, qui risque de déclencher une production de gaz nocifs en conditions anaérobiques.

Chacun de ces modes d'application, dicté par le traitement préalable des boues, a des avantages et des inconvénients comme il est indiqué dans l'encadré 9.

Encadré 9. Modes d'application des boues : avantages et inconvénients

Application de boues liquides :

- Apport d'eau au site d'épandage
- Coût de manipulation et de transport élevé
- Conservation des éléments nutritifs
- Risque élevé de pollution nitrique des eaux souterraines et particulièrement lorsque les sols sont sableux et le niveau piézométrique de la nappe est élevé

Application de boues séchées et/ou compostées

- Réduction du pool d'éléments nutritifs
- Commodité de manipulation
- Coût de transport faible

Remarques supplémentaires :

- L'application de boues doit être effectuée environ 14 jours avant la plantation
- La minimisation du coût de manipulation et de transport compense, en général, largement les frais inhérents d'élimination de l'eau
- Les boues séchées ou compostées jouent plus un rôle de conditionneur du sol améliorant ses propriétés physiques que fertilisant minéral

5.5. Coût d'application

Le coût d'application des boues liquides peut varier considérablement selon la méthode utilisée. Si les boues peuvent être utilisées dans le réseau d'irrigation ou dans des installations pré-existantes sur le site, le coût est de l'ordre de 0.16 \$US/m³ (Di Pinto et Mininni, 1985). Toutefois et selon les mêmes auteurs, le coût monte à environ 1 \$US/m³ si des containers ou un autre équipement spécial doivent être utilisés. Le coût d'application des boues déshydratées est d'environ 2 à 3 \$ US/tonne en utilisant un matériel classique d'épandage de fumier.

5.6. Stockage des boues

Etant donné que le cycle d'utilisation des boues en agriculture n'est pas synchronisé au cycle de production des boues, il est nécessaire d'aménager des hangars pour le stockage. La durée de stockage peut varier de 15 jours dans les pays chauds à plus de 300 jours dans les climats humides et froids. Cette contrainte de stockage est amplifiée dans les pays de climat humide et froid où les techniques intensives d'épuration, les plus prépondérantes, génèrent des quantités de boues largement supérieures à celles produites par les systèmes dits extensifs comme le lagunage naturel. Celui-ci semble être le plus adapté dans les régions d'Afrique du Nord et du proche orient. En outre, l'opération de curage des boues, préconisée pour ce type

de système d'épuration ne se fait qu'une fois tous les deux à trois ans mais la technique d'évacuation demeure peu maîtrisée..

5.7. Coût de stockage et de transport

A l'exception du cas d'incinération, il est toujours nécessaire de transporter les boues en dehors du site de production.

Dans des conditions méditerranéennes d'Italie par exemple, des ordres de grandeur de coût de transport des boues sont rapportés dans l'encadré 10.

Encadré 10. Ordres de grandeur de coûts de transport des boues par camion en Italie (Di Pinto et Mininni, 1985)

Boues liquides :

8 km (voyage aller – simple) : 2.35 – 3 \$ US/m³
30 km (voyage aller – simple) : 5.6 – 6.7 \$ US/m³
120 km (voyage aller – simple) : 15 - 16 \$ US/m³

Boues déshydratées :

8 km (voyage aller – simple) : 5.3 – 11.4 \$ US/tonne
30 km (voyage aller – simple) : 10.6 – 15 \$ US/tonne
120 km (voyage aller – simple) : 16.6- 20 \$ US/tonne

5.8. Principaux types d'usage des boues résiduaires

Les types d'usage et de valorisation des boues traitées sont succinctement rapportés dans l'encadré 11.

Encadré 11. Principaux types d'usage et de valorisation des boues résiduaires (adapté de OTV, 1997)

- Les céréales : éviter des épandages de boues liquides en hiver
- Les cultures fourragères : ces cultures valorisent au maximum l'azote tout au long de la phase végétative
- Les cultures pérennes de type arboriculture : pour ces cultures, l'utilisation des boues en fumure annuelle est moins appropriée
- Sylviculture : l'épandage se fait avant plantation
- Talus de route et d'autoroute, zones périphériques urbaines : lors des travaux d'aménagement des espaces verts et des travaux de terrassement, les boues apportent la matière organique, de l'azote et du phosphore pour un démarrage de la végétation
- Les pépinières, les substrats et les espaces verts: Pour ce type de cultures, le compost de boues est le plus recommandé. Dans ce cas, le compost doit répondre à deux exigences :
 - être broyé et tamisé **avec une taille de particules inférieure à 1.6 cm**
 - **être suffisamment mûr.** Un compost mûr présente moins de phyto-toxicité et est de ce fait, fortement recommandé pour les jeunes plantules, les semences en germination en champ ou dans les pépinières et pour les substrats horticoles ou de plantes ornementales. En effet, la faculté germinative et la croissance des jeunes plantes peuvent être inhibées par des substances intermédiaires précurseurs de l'humification comme les acides organiques par exemple (Soudi, 2001)
- La réhabilitation des sols dégradés. Cet usage se justifie pleinement dans le contexte des sols de la région du proche orient.

5.9. Quelques études de cas dans la région du proche orient

L'encadré 12 relate des exemples de résultats d'essais agronomiques ayant évalué les effets des applications de boues sur les propriétés du sol

Encadré 12. Effets de l'application des boues sur le sol à travers des études de cas

- Essais sur sol très sableux et de faible CEC en **Egypte** (El Naim, M. Abd and El Houseini, M. 2002) : Augmentation de la teneur en matière organique, de la CEC et de la capacité de rétention d'eau. Les essais ont montré une accumulation de métaux dans le sol et les cultures de maïs et de tournesol suite à une application continue des boues. Ce problème a été largement atténué lorsque les boues ont été chaulées et/ou appliquées sur une courte période.
- Essais sur sol limono-argileux d'**Algérie** : Les boues appliquées proviennent de la station d'épuration des eaux usées de Baraki en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000). Des boues liquides et séchées ont été expérimentées. Les résultats obtenus ont montré que les boues liquides ont amélioré la stabilité structurale des sols traités grâce aux sucres à métabolisme rapide. Les conductivités hydrauliques saturées les plus élevées sont observées avec les boues liquides (14,2 cm/h) et les boues solides (8,9 cm/h), ce qui traduit des effets bénéfiques sur la structure du sol grâce aux ciments organiques et au calcaire contenus dans ces substrats. Les rendements en blé pour l'ensemble des traitements sont très élevés par rapport à ceux ordinairement connus dans le pays. Les boues solides ont fourni le rendement le plus élevé en paille, ce qui laisse entrevoir, à terme, une augmentation substantielle des résidus de récoltes favorables au statut humique du sol.
- Essais sur sol argilo-limoneux à Ouarzazate au **Maroc** (Soudi et Jemali, 1998 et Jemali et Soudi, 1998). Le rendement en matière sèche de Ray Gras d'Italie a augmenté de manière significative suite aux applications des boues séchées. La teneur en matière organique du sol a également augmenté. Le taux de décomposition des boues a été estimé à 60% en moyenne. Le taux apparent de minéralisation de l'azote a été évalué à 44 %.
- Essais en **Tunisie** dans la station expérimentale de Cherchef sur sol alluvial calcaire de teneur moyenne en matière organique et de pH basique (Gabteni et Gallali, 1988) : La boue résiduaire de Cherguia constitue une source non négligeable en matière organique facilement minéralisable. Il s'agit là d'une conséquence positive certaine quant à son utilisation dans les sols de la région. La présence des éléments métalliques, cuivre et zinc, dans un milieu enrichi en boue ralentit la minéralisation de la matière organique. Ce ralentissement est d'autant plus important que la concentration en métaux est forte.

5.10. Récapitulatif sur les effets des boues sur la qualité des sols

Il est unanimement admis que l'utilisation des boues comme produits d'amendements organiques améliore les propriétés biologiques, physiques, chimiques et physico-chimiques des sols. Les modifications de ces propriétés dépendent du type de boue incorporé et de la nature du sol. Les principaux effets d'application de boues aux sols sont succinctement rapportés dans l'encadré 13.

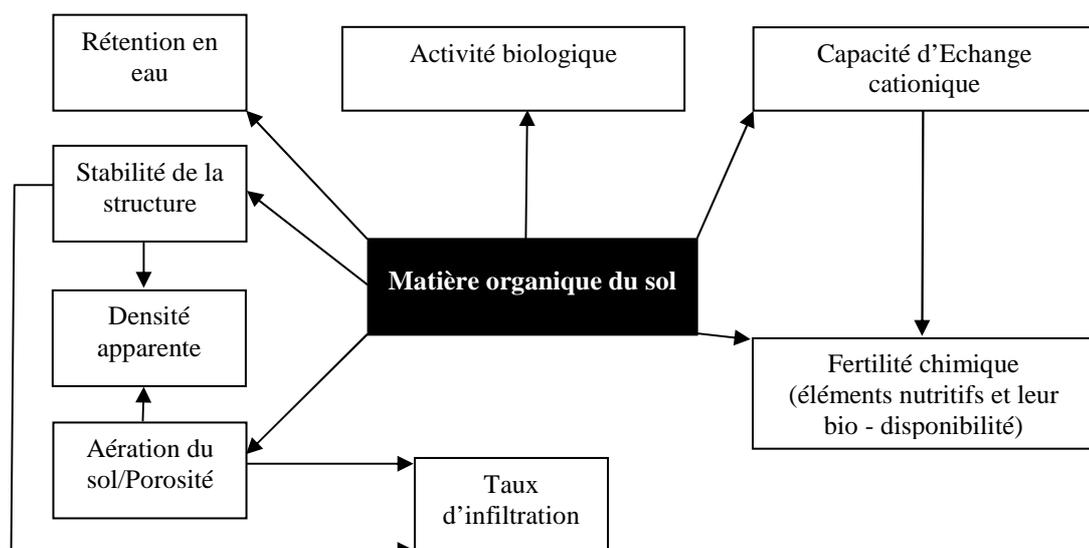
Encadré 13. Effets d'amendement avec les boues sur les propriétés du sol

pH : Selon la littérature, l'application des boues aux sols peut induire une diminution (Epstein *et al.*, 1976) ou une augmentation de pH (Silviera and Sommers, 1977). Cet effet semble être lié à la présence dans les boues du carbonate de calcium qui tamponne le pH ou à la production d'acides organiques lors de la première phase de biodégradation des boues. Dans tous les cas, la modification de pH demeure un facteur important qui conditionne la solubilité des métaux lourds.

CEC : L'addition de doses de boues trop élevées augmente la capacité d'Echange Cationique du sol (CEC) (Soon, 1981 et Epstein *et al.*, 1976). L'augmentation de la CEC est attribuée à la production de substances humiques chargées négativement qui s'associent avec les colloïdes argileux. Soulignons que l'augmentation de la CEC diminue la bio disponibilité des métaux lourds par leur adsorption sur les sites d'échange.

Matière organique : Etant donnée sa proportion importante dans les boues, sa teneur dans le sol augmente significativement suite à l'application des boues. De là, toutes les propriétés en relation avec la matière organique s'en trouvent améliorées : la capacité de rétention de l'eau par le sol, la stabilité structurale, la densité apparente, etc. Ces effets sont largement amplifiés dans les sols de texture grossière à sableuse.

Soulignons que la plupart des effets positifs des boues sur les autres propriétés des sols se fait par le biais de la matière organique comme le montre le schéma relationnel suivant. (Souidi, 2000).



6. Essais d'évaluation de la valeur agronomique des boues ou compost de boues

6.1. Objectifs des expérimentations

Les essais agronomiques ont pour objectifs l'évaluation de :

- la valeur fertilisante des boues séchées et/ou des boues compostées,
- l'impact sur les propriétés physico-chimiques des sols ;
- la mobilisation des éléments traces par la culture ;
- le rendement de la culture ;
- la qualité alimentaire des produits.

Ces essais peuvent être menés en pots de végétation (photo 3), sous serre, en pépinières et en plein champ. Des essais, appelés de démonstration, sont conduits chez des agriculteurs de niveaux de performance variés.

6.2. Traitements envisageables

Les traitements, qui peuvent être adoptés dans les essais agronomiques, sont rapportés dans l'encadré 14.



Photo 3. Essai en pots pour l'évaluation de la valeur fertilisante du compost des boues pour le cas de la laitue cultivée sur un sol sableux de la région côtière de Rabat - Maroc (Travaux conduits à l'IAV Hassan II, Rabat , Maroc)

Encadré 14. Traitements adoptés dans les essais agronomiques (en pots, sous serre, ou en plein champ) pour l'évaluation de la valeur du compost et de ses impacts (Soudi, 2001)

- Traitement 1. Aucun apport
- Traitement 2. Apport des doses d'engrais minéraux recommandés pour la culture retenue pour les essais.
- Traitement 3. Doses croissantes de boues complémentées avec des engrais minéraux sur la base de la valeur minérale des boues. Les doses de compost peuvent être à titre indicatif comme suit : 5 t/ha ; 10 t/ha, 20 t/ha, 30 t/ha, 40 t/ha. Ces doses peuvent varier selon le type de sol et de la culture.

Pour chaque traitement, un certain nombre d'analyses et de mesures sont effectuées avant le démarrage des essais, au cours du cycle de la culture et à la récolte.

Ces analyses et mesures concerneront :

- La caractérisation physico-chimique des sols à l'état initial et à la récolte
- La caractérisation physico-chimique des boues utilisées
- La caractérisation des eaux d'irrigation
- Les paramètres de croissance et de développement de la culture expérimentée
- Le rendement de la culture
- La mobilisation des éléments nutritifs par la culture
- La mobilisation des métaux lourds par les différentes parties de la plante
- Les teneurs en métaux lourds dans le sol amendé

D'autres essais peuvent être conduits dans des pots de pépinières pour le choix de proportions optimales entre une fraction minérale (pouzzolanes, perlite, etc.) et les boues.

Il conviendrait, dans certains essais, d'implanter des lysimètres pour examiner la percolation des nitrates au-delà de la zone racinaire. Ce type d'essais est très recommandé lorsque le sol est de texture sableuse et la nappe peu profonde.

Les dispositifs expérimentaux peuvent être de deux types :

- **Dispositifs scientifiques** de type complètement aléatoire (randomisation totale) avec trois répétitions : ces dispositifs permettent un dépouillement statistique des données et une comparaison des résultats des différents traitements. Ces essais peuvent être conduits sous serre, en pots de végétation et en plein champ.
- **Dispositifs simples chez des agriculteurs pilotes** : une parcelle divisée en trois ou quatre sous parcelles sur lesquelles on applique les traitements qu'on désire tester. Ces essais pilotes permettent aussi de valider les résultats issus des essais scientifiquement élaborés et de les pondérer en fonction du type de sols et de types de cultures.

Les traitements qui peuvent être adoptés dans ce type d'essais sont rapportés dans l'encadré 15.

Encadré 15. Exemple de traitements qu'on peut adopter dans des essais de démonstration chez les agriculteurs

- • T1 : 0 tonne de compost/ha
- • T2 : 20 tonnes de compost/ha
- • T3 : 0 tonne de boues/ha + fertilisation minérale recommandée sur la base du besoin de la plante, du rendement de la culture et d'analyses du sol
- • T4 : 20 tonnes/ha de boues + un complément d'engrais minéraux équivalent par exemple à la moitié des unités fertilisantes appliquées dans le cas du traitement T3.
- D'autres doses peuvent être testées selon la même procédure en fonction du type de sol et de la culture pratiquée.

Ce type d'essais doit représenter les différentes situations culturales et les types de sols de la région considérée.

D'autres tests d'évaluation de l'effet des boues sur la phyto-toxicité peuvent aussi être effectués. La méthode la plus connue est celle de test de germination préconisée par Zucconi et al. (1984). Cette méthode avait été conçue initialement pour tester le degré de maturité des composts. Le principe consiste à placer des graines de cresson (*Lepidum Sativum*, L.) dans une série boîtes de Pétri avec papier filtre imbibé de doses croissantes de boues liquides ou d'extrait de boues séchées ou compostées ; une autre série témoin (sans boues) est préparée. L'ensemble est placé dans un incubateur réglée à 27 °C pendant 24 heures. A la fin de l'incubation, le nombre de graines germées et la longueur des racines sont évalués. Un Indice de Germination (IG) est ensuite calculé par la relation suivante :

$$IG : (GB/GT) \cdot (LB/LT) \cdot 100$$

IG: Indice de Germination

GB: Nombre de graines Germées dans le cas d'apport des Boues

GT : Nombre de graines Germées dans le cas du traitement Témoin

LB : Longueur des racines dans le cas d'apport des Boues

LT : Longueur des racines dans le cas du traitement Témoin

7. Directives de contrôle et de surveillance

Ces directives concernent les boues, les végétaux, le sol et les eaux souterraines.

7.1. Boues

Les paramètres qui doivent être analysés sont rapportés dans l'encadré 16.

Encadré 16. Paramètres de contrôle de la qualité des boues destinées à un usage agricole (Conseil de l'U.E, 1986)
--

Matière sèche (%) Matière organique (% de la matière solide) pH

Macro éléments en % de la matière sèche
--

N total N ammoniacal Phosphore total Potassium total

Micro-éléments exprimés en mg/kg de matière sèche
--

Cu Ni Zn Cd Pb Hg Cr Mo Se
--

Après analyse des boues, les doses d'utilisation sont recommandées par un ingénieur ou technicien agronome sur la base de: (i) la composition des boues, (ii) les caractéristiques des sols, (iii) les précédents culturaux et (iiii) les besoins en éléments nutritifs des cultures. Les doses doivent, dans tous les cas, être ajustées pour éviter une accumulation d'éléments traces métalliques comme développé plus haut.

7.2. Végétaux

La phyto-toxicité est une situation provoquée par un excès de certains éléments dans le sol. Par exemple, chez les végétaux, il en résulte soit des désordres physiologiques, soit des accidents plus graves (lésions, dépérissement et finalement mort de la plante), soit une adaptation progressive des espèces au sol contaminé. Les symptômes (chloroses, dessèchement, chute des feuilles ou fleurs...) sont non seulement en rapport avec la concentration de l'agent toxique mais aussi avec sa forme chimique (Cr^{6+} nettement plus toxique que Cr^{3+}) (Delcarte, 1988 ; Cámara et al, 2000 ; Jain et Ali, 2000). La toxicité est déterminée en fonction de la biodisponibilité des éléments (Adriano *et al*, 1997).

Il serait donc judicieux de contrôler périodiquement la composition métallique des produits des végétaux cultivés obtenus dans des sols amendés avec des boues. Ce contrôle doit concerner toutes les espèces car il existe des plantes accumulatrices de métaux qui ne manifestent pas de symptômes de phyto-toxicité. Dans ce cas, la toxicité métallique est transférable dans les chaînes trophiques.

7.3. Sols

Sachant que la biodisponibilité des métaux lourds diffère d'un sol à l'autre et que les apports répétés de boues ou de compost de boues peuvent engendrer une accumulation, il est prudent d'en contrôler la concentration des principaux dans le sol et de les comparer aux normes. Les principaux métaux lourds retrouvés dans les boues sont les suivants: Hg, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn et Ni. Dans le cas où on procède au co-compostage des boues avec les déchets ménagers, cette liste doit être complétée par les éléments : As, Mo et Se.

7.4. Eaux

L'utilisation des boues dans des sols situés sur des nappes superficielles à faible niveau piézométrique peut engendrer des risques de pollution de ces eaux et particulièrement dans le cas d'utilisation des doses excessives sur des sols de texture sableuse.

L'épandage des boues à proximité des eaux de surface mérite aussi d'être contrôlé. En effet, il convient de contrôler le ruissellement des eaux à partir des zones d'épandage pour éviter la livraison de phosphore et d'azote et le déclenchement du phénomène d'eutrophisation.

7.5. Récapitulatif de quelques bonnes pratiques

L'encadré 17 relate un certain nombre de précautions et de conseils concernant l'utilisation des boues résiduelles en agriculture.

Encadré 17. Conseils et précautions concernant la pratique d'utilisation des boues

- Les conditions de l'épandage doivent correspondre aux besoins des cultures pour éviter des excès pouvant engendrer des effets néfastes sur l'environnement
- Incorporer les boues au sol et les distribuer de manière uniforme
- Le pH du sol doit être de préférence supérieur à 6 pour atténuer les risques de pollution par les éléments traces et leur transfert dans les chaînes alimentaires
- Analyser les boues produites tous les six mois (matières sèches, matières organiques, pH, N, P, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn)
- Ne pas épandre des boues sur des cultures consommées à l'état cru. Un délai de six mois entre l'épandage des boues et la mise en place de la culture est recommandé. Les boues ne pourront donc être épandues qu'une année sur trois lorsque le sol est laissé en jachère
- Eviter l'application des boues sur des pentes fortes caractérisées par un ruissellement excessif
- Appliquer des doses modérées aux sols de texture sableuse pour éviter la percolation des lixiviats vers les eaux souterraines
- Eviter l'application des boues dans les jardins et pelouses de maisons très fréquentées par les enfants
- Eviter l'utilisation des boues pour les cultures à tubercules.

8. Production de biogaz et de chaleur : une autre voie de valorisation

La filière de production de biogaz permet à la fois de récupérer le biogaz et de réduire le volume et la charge polluante et les concentrations en pathogènes. Elle se base sur un traitement anaérobique des boues qui s'opère dans les bassins de décantation ou dans des digesteurs dotés d'un système de collecte de biogaz. Un curage annuel des boues digérées est effectué. Une station pilote a été mise en œuvre et pilotée par Wauthelet à Agadir (Maroc) dans le cadre de la coopération maroco-allemande (GTZ-CDER / Programme Spécial Energie, 1988-98)

Après fermentation anaérobique, les boues préservent leur valeur fertilisante. Les éléments ayant subi une déperdition sont le soufre (sous forme H_2S) et le carbone (sous forme de méthane). Les boues résiduelles peuvent être ainsi valorisées en agriculture. Comme pour le cas des boues brutes, les boues résiduelles fermentées peuvent être séchées ou compostées pour la suppression des germes pathogènes

Le biogaz produit est utilisé en tant que combustible ou carburant et peut co-générer la chaleur et l'électricité à la fois. Une épuration du biogaz peut être nécessaire pour certains usages. Cette épuration consiste à enlever l'eau et H_2S .

Selon Wauthelet (1999), la production de biogaz atteint environ 22 litres de biogaz par habitant et par jour, soit près de 15 litres équivalent essence par jour pour 1000 habitants. A titre d'illustration, la station d'épuration d'Achères (Paris) traite 2,1 millions m^3 d'eaux usées par jour et produit 150 000 m^3 de biogaz par jour, soit 211 millions kWh/an (Wauthelet, 1999). L'énergie est utilisée pour alimenter l'intégralité des machines de la station. Selon les estimations faites par Wauthlet (1999) sur les quantités d'eaux usées produites uniquement par les villes marocaines et en considérant que seulement 10 % de ces eaux fermentent (en conditions anaérobies), la production de méthane s'élève à 4 314 tonnes CH_4 /an (calculé sur base de 'IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories').

9. Conclusions et recommandations

Le présent manuel a tenté de faire le point sur les filières de traitement et d'évacuation des boues. Il en résultait que toutes les filières présentent des avantages et des inconvénients sur les plans technique, économique et écologique. Il n'existe pas de solution parfaite.

Il a été toutefois démontré qu'un usage rationnel des boues, en tant que produit d'amendement organique des sols, constitue une option écologiquement durable qui consiste à réinsérer la matière organique dans les chaînes trophiques. L'option relative à l'incinération des boues ne se justifie pas sur le plan technico-économique et environnemental. L'option de mise en décharge contrôlée peut être retenue lorsque les possibilités de valorisation des boues ne sont pas offertes ou lorsque les boues sont très chargées en éléments traces.

Pour le contexte de la région du proche orient, les options de traitement de boues les plus justifiées sur les plans économiques et écologiques sont le séchage prolongé des boues dans des lits de séchage et/ou le compostage des boues ou leur co-compostage avec d'autres déchets biodégradables (déchets verts, déchets ménagers et déchets de l'industrie agroalimentaire). Soulignons que dans ces régions, la faible activité industrielle en zones rurales et dans les petites et moyennes communes, fait que le problème de métaux lourds se pose avec moins d'acuité que les grands centres urbains.

Si le séchage ou le compostage permettent d'anéantir les risques sanitaires liés aux pathogènes, la contrainte relative aux éléments traces métalliques demeure posée et nécessite d'être gérée. Après une mise en point sur les normes en vigueur à l'échelle internationale, des normes guides, exprimées en terme de Teneurs Cumulatives Limites dans le sol, sont proposées. Les principaux paramètres de sol pris en compte, en relation avec le risque de pollution métallique et de transfert des éléments traces dans les chaînes trophiques, sont le pH, la Capacité d'Echange cationique et la texture du sol. Notons que les sols de la région du proche orient sont dans la majorité des cas de pH neutre à franchement basique. Ces conditions atténuent les risques d'accumulation des éléments traces dans les plantes à cause de leur faible solubilité dans ces conditions de pH.

En ce qui concerne les conditions d'utilisation des boues, quelques conseils pratiques ont été exposés. Il est toutefois difficile de donner des recettes standard à cause de la variabilité de la composition des boues assez bien illustrée par une variété d'exemples et de la nécessité d'adapter les doses et les méthodes d'application des boues à leur nature et aux types de sols. A ce niveau, des éléments méthodologiques ont été exposés pour guider à l'évaluation de la valeur fertilisante des boues et leurs impacts. Il a été également recommandé de conduire des essais de démonstration chez des agriculteurs et dans différentes situations culturales et agro-pédologiques.

L'utilisation des boues est une pratique qui doit être impérativement associée à des mesures de contrôle et de surveillance. En effet, un contrôle périodique de la composition des boues, des paramètres de qualité des sols et des eaux s'impose dans le cadre d'un système de suivi et de surveillance.

Quatre limitations majeures peuvent être déduites à travers la consultation de la littérature internationale dans ce domaine:

- Les résultats de recherche en matière de dynamique des éléments traces métalliques et leurs effets sur la plante ne sont pas très étoffés et se soldent dans la plupart des cas par des conclusions contradictoires.
- Les conditions de survie des pathogènes ne sont pas bien élucidées.
- La recherche en matière de dynamique et d'effets de micro - polluants organiques est très limitée.
- Les aspects économiques liés à l'utilisation des boues sont quasi – absents.

Ces aspects se caractérisent par un déficit plus important dans les régions du proche orient et les résultats disponibles ne sont pas toujours accessibles.

Références bibliographiques

ADEME. (2001). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture : Fiche technique 3832 élaborée par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration.

Adriano D.C., Chlopecka A., Kaplan D.I., Clijsters H., Vangronsveld J. (1997). Soil contamination and remediation : philosophy, science and technology. In Contaminated Soils. Edited by R. Prost. Paris : INRA. p. 465-504.

Baker D. F., Bouldin D.R., Elliott H.A., and Miller J.R. (1985). Criteria and recommendation for land application of sludges in the Northeast. Bulletin 851. PA State Univ. Agr. Exp. Stat., University Park, PA. Cardwell, D.H., R.E. Erwin, and H.

Bruce A.M. and Newman P.J. (1992). Processing of organic sludges and liquid agricultural wastes. In Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes. Edited for E.U by. Hall, J.E., P. L'Hermite and P.J. Newman. p. 9 - 44.

Cámara C., Cornelis R., Quevauviller P. (2000). Assessment of methods currently used for the determination of Cr and Se species in solutions. Trends in Analytical Chemistry 19, 189-194.

Chaney R.L. (1975). Metals in plants – Absorption mechanisms, accumulation, and tolerance. Metals in the Biosphere, Univ. Of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. p. 79-99.

Chaney R.L.(1980). Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. In: Sludge – Health Risks of land Application. G. Bitton, B.L. Damron, G.T. Eds, and J.M. Davidson (eds). Ann Arbor Sci. Publ., Inc., Ann Arbor, MI. p. 59 – 83.

Chaussod R. (2000). Boues de stations d'épuration et métaux lourds. Publication de l'INRA-France.

Delcarte E. (1988). Contribution à la caractérisation analytique de contaminants métalliques des écosystèmes terrestres. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en Sciences Agronomiques. Gembloux: FUSAGx. 277p.

Department of the Environment. (1989) Code of Practice for Agricultural Use of Sewage Sludge. Her Majesty's Stationery Office, London.

Di Pinto A.C. and Mininni G. (1985). Optimization of processing, managing and disposing of swage sludge Part II : disposal options. 86 – 93; In Processing and use of Organic Sludge and liquid Agricultural Wastes. In: Proceedings of the fourth International Symposium held in Rome, Italy. P. L'hermite (ed) for the Commission of the EU.

Doran J.W., Ellis J.R. and McCalla T.M. (1976). Microbial concerns when wastes are applied to land. In : Land as waste management alternatives. R.C. Loehr (ed.). Ann. Arbor Sci. Publ., Inc.,Ann Arbor, MI. p. 343-361

- Dridi B. et Zerrouk F. (2000). Apport de boues d'épuration et propriétés d'un sol en Algérie Cahiers d'Etudes et de Recherches francophones/agricultures ; Vol 9, N° 1, p. 68-71.
- Duchène P. (1990). Les systèmes de traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités. Documentation technique N° 9 de FNDAE, France.
- El Naim M. Abd and El Houseini M. (2002) Environmental aspects of sewage sludge application in Egypt 17th WCSS, 14–21 August 2002, Thailand.
- Elliot L.F. and Ellis J.R. (1977). "Bacterial and Viral Pathogens Associated with Land Application of Organic Wastes." *Journal of Environmental Quality* 6:245-51.
- Elliot H.A. (1984). Sludges : Generation, Treatment and Characteristics. In Criteria and recommendations for land application of sludges in the Northeast. Bulletin of the agricultural Experiment Station in Pennsylvania.
- EPA. (1985). Composting of municipal wastewater sludges PB88-186119
- Epstein E., Taylor J.M., and Chaney R.L. (1976). "Effects of Sewage Sludge and Sludge Compost Applied to Soil on Some Soil Physical and Chemical Properties." *Journal of Environmental Quality* 5:422-26.
- Evanylo G.K. (1999). Land Application of Biosolids for Agricultural Purposes in Virginia. Publication 452-300. Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech.
- Gabteni N. et Gallali T. (1988). Étude expérimentale des interactions entre éléments métalliques et la minéralisation de la matière organique d'une boue résiduaire ajoutée à un sol. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, no 3, 1988 : 255-261*
- Hebette A. (1996). Guide Pratique de la gestion des déchets solides urbains en Afrique sub – saharienne. IAGU-GREA/PNUD/Banque mondiale de l'eau et de l'assainissement
- Jain C.K., Ali I. (2000). Arsenic : occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research* 34, 4304-4312.
- James K., Clapp C.E., Dowdy R.H. and Larson W.E. (1988). Sewage Sludge Management : Land application of municipal sewage sludge to a terraced watershed in Minnesota. Miscellaneous Publication 56-1988. Minnesota Agricultural experiment Station. St Paul, Minnesota, USA.
- Jemali A. et Soudi B. (1998). Valorisation agricole des boues résiduares : Valeur fertilisante et efficacité d'utilisation de l'azote par le Ray gras d'Italie. In. Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for small communities : Mediterranean and European Experiences » Edited by R. Choukr Allah.
- Kockmann F. 2001. Utilisation des boues chaulées en agriculture : mieux connaître leur valeur amendante. Actes du Colloque sur l'acidification des sols, 4 et 5 Avril 2001, AFES – INRA de Versailles, France.

OTV. 1997. Traiter et valoriser les boues. Collection. Ouvrage collectif OTV. Paris 86240 Ligugé

Norme Tunisienne Enregistrée NT 106.20 (2002). Matières fertilisantes – Boues des ouvrages d'épuration des eaux usées. Editée par l'Institut National de Normalisation et de la Propriété Industrielle.

Pahren H.R., Lucas J.B., Ryan J.A., and Dotson G.K. (1979). "Health Risks Associated with Land Application of Municipal Sludge." *Journal of the Water Pollution Control Federatmn* 51 :2588-2601.

Pollock J. (2002). Guidance Document Agronomic Utilization and Storage of Sewage Sludge draft document revised on 5/16/02.

Silviera D.J. and Sommers L.E. (1977). "Extractability of Copper, Zinc, Cadmium, and Lead in Soils Incubated with Sewage Sludge." *Journa/ of Environmental Quality* 6:47-52.

Soon Y.K. (1981). "Solubility and Sorption of Cadmium in Soils Amended with Sewage Sludge." *Journa/ of Soi/ Science* 32:85-95.

Soudi B. (2000). Eléments méthodologiques de mise en place d'un Système de Suivi et d'Evaluation de la qualité des sols sous irrigation : études de cas de Tadla et des Doukkala. Rapport préparé pour la FAO-AGLL.

Soudi B. (2001). Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost: Cas des petites et moyennes communes au Maroc. Actes Editions, Série agriculture & Environnement. Ouvrage préparé pour l'UNIDO et ENDA Maghreb.

Soudi B. et Jemali A. (1998). Valorisation agricole des boues résiduaires : Impact des amendements sur la dynamique de l'azote des sols. In. Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for Small Communities : Mediteranean and European Experiences » Edited by R. Choukr Allah.

Watson D.C.(1980). "The Survival of Salmonellae in Sewage Sludge Applied to Arable Land." *Water Pollution Control* 79:11 - 18.

Wauthelet M. (1999). Traitement anaérobie des boues et valorisation du biogaz. Publication de la FUSAGx, Gembloux, Belgique.

Xanthoulis D. (1996). Rapport de synthèse: Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles, Ouarzazate, Maroc. PNUD, FAO, MARA – Maroc.

Zuconi F., Pera A., Forte M., and Debertoldi M.. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle* 22:54–57